

**Technická univerzita v Liberci**  
Fakulta textilní

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**STAVEBNÍ IZOLACE Z VLNĚNÉHO VLÁKNA**  
**BUILDING INSULATION FROM WOOL FIBRES**



**2006**

**Jan Tuvora**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta textilní**

**Katedra netkaných textilií**

Studijní program: M3106 Textilní inženýrství

Studijní obor: netkané textilie

## **STAVEBNÍ IZOLACE Z VLNĚNÉHO VLÁKNA**

## **BUILDING INSULATION FROM WOOL FIBRES**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jaroslav Hanuš Ph.D.

Rozsah práce a příloh: 70

Počet stran textu: 53

Počet obrázků: 34

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 8

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 11. května 2006

.....

Podpis

## **Poděkování:**

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Hanušovi Ph.D. za odborné vedení, ochotu, trpělivost a podnětné rady. Dále bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Luboši Hesovi, CSc. za zapůjčení přístroje Isomet 2104.

Dík náleží také mým rodičům za morální i finanční podporu při studiu.

## STAVEBNÍ IZOLACE Z VLNĚNÉHO VLÁKNA

### ANOTACE

Práce se zabývá studiem závislosti tepelně izolačních vlastností vlněné izolace a vlhkosti. Experimentálně ověřuje vliv hustoty izolace  $\rho$  na tepelnou vodivost  $\lambda$ , objemovou tepelnou kapacitu  $c \cdot \rho$  a teplotní vodivost  $a$  při definovaných podmínkách okolí. Experimentálně ověřuje vliv vlhkosti v izolaci absorbované z okolního prostředí na předchozí parametry.

## BUILDING INSULATION FROM WOOL FIBRES

### ANNOTATION

The thesis deals with the research of the heat insulating nature of wool isolation (cover) and moisture. Experimentally test influence of the isolation density  $\rho$  to heat conductance  $\lambda$ , volume heat capacity  $c \cdot \rho$  and thermal diffusivity  $a$  in the defined ambient conditions. Experimentally test influence of the moisture in the isolation absorbed from surroundings to the mentions parameters.

**Klíčová slova:**

ovčí vlna

přijatá vlhkost

stavební tepelná izolace

tepelná vodivost  $\lambda$

teplo

**Key Words:**

ewe wool

regain humidity

thermal building insulation

thermal conductivity  $\lambda$

heat

# Obsah

Obsah .....	7
Seznam symbolů a zkratk .....	8
1. Úvod a cíl práce .....	10
2. Izolační materiály používané pro izolaci budov .....	12
2.1 Ovčí vlna – charakteristické vlastnosti .....	16
2.1.1 Nečistoty ve vlně .....	16
2.1.3 Morfologie .....	16
2.1.4 Chemické složení vlny .....	17
2.1.5 Mechanické vlastnosti vlny .....	18
2.1.6 Sorpční vlastnosti .....	19
2.1.7 Tepelné vlastnosti vlny – teplo sorpce .....	22
3. Šíření tepla vláknennými materiály – základní pojmy .....	25
3.1 Vedení tepla .....	25
3.2 Proudění tepla .....	29
3.3 Záření tepla .....	30
4. Vliv parametrů textilie na tepelnou vodivost $\lambda$ .....	32
4.1 Vliv velikosti a množství pórů .....	32
4.2 Vliv zaplnění a hustoty (objemové hmotnosti) .....	32
4.3 Vliv vlhkosti .....	33
4.4 Vliv jemnosti vláken .....	33
4.5 Vliv směru toku tepla .....	34
4.6 Vliv teploty okolí .....	34
5. Požadavky na stavební izolace .....	35
5.1 Tepelně izolační výrobky .....	36
5.1.1 Třídy (skupiny) izolací .....	37
5.2 Porovnání parametrů vybraných stavebních materiálů .....	37
5.2.1 Porovnání parametrů vybraných výrobků stavebních izolací .....	38
5.3 Jevy ovlivňující tepelné vlastnosti staveb .....	38
6. Stavební izolace z vlněného vlákna .....	41
6.1 Obecný postup výroby izolace z vlny .....	41
6.2 Parametry a vlastnosti vlněné izolace .....	41
6.3 Metody a způsoby měření součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ .....	42
6.3.1 Měřicí přístroj ISOMET 2104 .....	44
6.4 Plán měření v rámci experimentu .....	47
6.4.1 Zjištění závislosti součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ na hustotě $\rho$ izolace .....	47
6.4.2 Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost $\lambda$ .....	49
7. Experiment .....	50
7.1 Výroba vzorků izolace .....	50
7.2 Příprava vzorků pro měření tepelné vodivosti $\lambda$ .....	51
7.3 Měření součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ .....	52
7.3.1 Závislost $\lambda$ na hustotě $\rho$ izolace .....	52
7.3.2 Závislost $\lambda$ na vlhkosti $\varphi_i$ .....	53
7.4 Diskuze k výsledkům .....	56
7.4.1 Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ , tepelné objemové kapacity $c \cdot \rho$ a teplotní vodivosti $a$ na hustotě $\rho$ .....	56
7.4.5 Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ , tepelné objemové kapacity $c \cdot \rho$ a teplotní vodivosti $a$ na vlhkosti vzorků $\varphi_i$ a relativní vlhkosti $\varphi$ .....	59
8. Závěr .....	63
Seznam použité literatury .....	64

## Seznam symbolů a zkratek

$\alpha$	[m <sup>2</sup> /s]	- teplotní vodivost
$a$	[g]	- absolutní vlhkost
$a_n$	[g]	- absolutní vlhkost nasyceného vzduchu
$A$	[m <sup>2</sup> ]	- plocha materiálu, kterou prochází tepelný tok
$C$	[J/kg.K]	- měrná tepelná kapacita látky (materiálu)
$d$	[m]	- průměr vláken
$\frac{dQ_i}{d\varphi}$	[J/g]	- změna integrálního tepla sorpce
$grad(T)$	[K]	- gradient teploty
$h$	[m]	- tloušťka materiálu
$p$	[W/m <sup>2</sup> .K]	- součinitel přestupu tepla prouděním
$l$	[m]	- délka
$L_v$	[J/g]	- teplo vypařování (latentní)
$\lambda$	[W/m.K]	- tepelná vodivost materiálu
$\lambda_{H_2O}$	[W/m.K]	- tepelná vodivost vody
$\lambda_s$	[m]	- vlnová délka
$\mu$	[1]	- zaplnění
$m$	[g]	- hmotnost materiálu
$m_s$	[g]	- hmotnost suchého vzorku
$m_v$	[g]	- hmotnost vody
$n_0$	[-]	- jednotkový vektor ve směru normály
$P$	[W]	- celkový tepelný výkon
$q$	[W/m <sup>2</sup> ]	- hustota tepelného toku
$Q$	[J]	- teplo
$Q_d$	[J/g]	- teplo sorpce
$Q_i$	[J/g]	- teplo integrální (smáčení)
$Q_k$	[J/g]	- teplo bobtnání
$\varphi$	[%]	- relativní vlhkost
$\varphi_i$	[g/g]	- vlhkost izolace
$\varphi_v$	[%]	- vlhkost vláken]



$R$	$[\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}]$	- tepelný odpor
$S$	$[\text{m}^2]$	- plocha
$\rho$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$	- hustota látky (materiálu), objemová hmotnost
$t$	$[\text{tex}]$	- jemnost vláken
$t$	$[^\circ\text{C}]$	- teplota
$T$	$[\text{K}]$	- absolutní teplota tělesa
$T_\infty$	$[\text{K}]$	- teplota okolí
$\Delta T$	$[\text{T}]$	- rozdíl teplot
$\partial T / \partial \tau$	$[\text{K}/\text{s}]$	- časová změna teplotního pole
$V$	$[\text{m}^3]$	- objem tělesa ve kterém se teplo akumuluje
$V_v$	$[\text{m}^3]$	- objem vláken
$V_c$	$[\text{m}^3]$	- celkový objem vlákenného útvaru

# 1. Úvod a cíl práce

V posledních letech se stává zateplování budov velmi aktuálním tématem. Správnou izolací staveb získáváme velké množství úspor elektrické energie či jiných paliv. Špatná izolace vede ke zvýšené spotřebě energie, a to se negativně projeví na životním prostředí, vyšší emise škodlivin znečišťují vzduch a zatěžují atmosféru. Zbytečně se také plýtvá surovinovými zdroji. Vhodná izolace vytváří také pozitivní prostorové klima, které přispívá ke zdraví obyvatel. V chladném a vlhkém prostředí se lidé necítí dobře. Za příjemnou se považuje vyrovnaná teplota, trvale stejná ve všech prostorách. Takové prostorové klima, považované ze subjektivního hlediska za pozitivní, se ve stavební fyzice označuje za tepelnou pohodu [33]. Dobrá izolace také mimo jiné chrání stavební materiály a zvyšuje jejich životnost i hodnotu nemovitosti. Správná izolace předpokládá koncepci zahrnující celou stavbu, tj. od konstrukce základové desky přes stěny, okna a dveře až ke střešní krytině. Během stavby nových objektů lze přímo volit adekvátní tepelně izolační materiály, jakými jsou jak různé druhy cihlářských výrobků, lehčených betonů, samotné dřevo tak i materiály vyrobené speciálně pro izolační účinky, jako na příklad čedičové vaty, skelné vaty, polystyren, polyuretan aj. Jejich výroba a likvidace jsou však spojeny s mnohými ekologickými problémy. Mezi ně lze zařadit například těžbu surovin (čedič, křemičitý písek), se kterou jsou spojeny rizika související se změnou rázu krajiny i mnohé další. Mezi další důležité a nezanedbatelné nevýhody patří energetická náročnost při výrobě, nutnost používání surovin z neobnovitelných zdrojů (hlavně ropa), omezené možnosti recyklace atd.

Proto v posledních deseti letech můžeme zaznamenat výrazný nárůst tepelných izolací na bázi přírodních vláken, především izolací vyrobených z ovčí vlny. Její předností je to, že reaguje na proměnu podmínek okolí. To jí propůjčuje vlastnosti, které jsou v porovnání s ostatními materiály pro izolace výjimečné. Uvádí se, že vlivem aktivních „vlhkostních vlastností“ může vlna fungovat jako významný stabilizátor úrovně vlhkosti interiéru [22]. Za zmínku stojí, že zpracování ovčí vlny vyžaduje pouze 15% energetických nákladů spojených s výrobou izolace v porovnání s tepelnými izolacemi z minerálních vláken [22]. Ovce je živý tvor, který patří do přirozeného řetězce života na Zemi, a produkuje izolační materiál bez továrních hal a strojů s minimem nákladů i lidské práce. Je také zdravotně nezávadná a na konci svého využívání může být vlna buď recyklována a opět využita, nebo biotechnologicky zlikvidována (kompost).

Na aplikace vlněných izolací do staveb především rekreačního charakteru existuje dnes množství propagačních materiálů [13, 14, 15, 22], které však postrádají odkazy na experimenty, ze kterých jsou uváděné informace čerpány. Na trhu jsou produkty různých parametrů (tloušťka, hustota), k výběru vhodného produktu však není dostatek seriózních informací.

Výrobce vlněné izolace (firma TUMAG) požádal proto KNT TU v Liberci o zadání diplomové práce na téma „stavební izolace z vlněného vlákna“, která by upřesnila poznatky o vlivu hustoty  $\rho$  vlněné izolace při definovaných podmínkách okolí na její tepelnou vodivost  $\lambda$  a jednak upřesnila poznatky o vlivu vlhkosti obsažené ve vlněné izolaci na její tepelně izolační vlastnost (vodivost  $\lambda$ ).

**Cíl této práce byl proto v návaznosti na zmíněný požadavek firmy definován následovně:**

- **Vypracovat rešerši o současném stavu aplikace vlněných izolací používaných pro izolaci budov;**
- **Experimentálně ověřit vliv hustoty izolace  $\rho$  na její tepelnou vodivost  $\lambda$  při definovaných podmínkách okolí;**
- **Experimentálně ověřit vliv vlhkosti v izolaci (ve vláknech) na její tepelnou vodivost  $\lambda$ .**

Od výsledků navržených experimentů se očekává potvrzení následujících hypotéz:

1. Funkce závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  na hustotě izolace  $\rho$  má minimum v praktickém rozsahu hustot izolací  $\rho$  vyráběných firmou TUMAG (výroba izolace s minimální tepelnou vodivostí  $\lambda$  je cílem výrobce i zákazníka).
2. Vliv vlhkosti v izolaci nepřekročí hranici „třídy“ izolace. (Třídění izolací podle tepelné vodivosti  $\lambda$  viz kap. 5.1.1.

## 2. Izolační materiály používané pro izolaci budov

Obecně se pojmem „**tepelná izolace**“ míní jednak ochrana objektů před venkovním chladem, jednak ochrana před únikem tepla z obytných prostorů. Tepelná izolace však chrání nejen před chladem, ale i před teplem - udržuje stabilní teplotu uvnitř dobře zaizolovaného objektu po celý rok.

Hlavní funkce tepelně izolačních materiálů jsou:

- Ochránit objekt před tepelnými ztrátami;
- Udržovat určité množství vlhkosti mezi tepelnou izolací a stěnami objektu;
- Splnit vhodnou akumulaci tepla, což je schopnost teplo pohltit a při ochlazení okolí je opět vydávat;
- Schopnost zadržovat teplo a současně zabránit průchodu chladnějšího média u stavebních a průmyslových izolací.

Pro izolování objektů se používá velké množství materiálů, u kterých je důležitá řada vlastností, jakými jsou např.: tepelná vodivost, navlhavost, odolnost proti hoření, odolnost proti bakteriím, odolnost proti živočichům atd. Mezi nejznámější a nejčastěji používané materiály patří:

### *Kamenná vlna*

Je izolační materiál vyrobený roztavením přírodních surovin. Kamenná vlna vzniká tavením čediče v kupolové peci při teplotě nad 1500°C. Vznikne láva, která se při vytékání na rotující válce změně odstředivou silou na malé kapky, které odlétávají do usazovací komory. Kapky lávy se vlivem velké rychlosti protahují na vlákna, tím vznikne - základ izolace. Vlákna jsou ukládána na dopravník do vrstvy požadované tloušťky. Přidávají se různé přísady, které zajistí fixaci vrstvy, pokračuje vytvrzování přísad a chladnutí izolace. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  izolací firmy Rockwool je v rozmezí 0,035 – 0,055 [W/mK], záleží na typu výrobku. Výrobky z této kamenné vlny se používají pro izolování střech, podlah, přiček, omítek aj. Mezi výhody této izolace patří především nehořlavost, vysoká propustnost vodní páry, hydrofobičnost (díky speciálním hydrofobizačním olejům, které jsou přidávány během výrobního procesu) a nepodléhá žádným klimatickým vlivům [11].

### *Skelná vlna*

Skelná vlna se vyrábí tavením při teplotě 1440 °C ze směsi sklářského písku, sody, dolomitu, vápence, boraxu a střeptů. Vznikne plastické sklo, které vtéká do zvláknujícího stroje. Ze stroje se táhnou asi 0,5 m dlouhá vlákna, která se postřikují pryskyřicí, která zajistí fixaci vrstvy. Takto vyrobená vlákna se rozkládají na plochu pohybujícího se síťového dopravníku, na kterém jsou vlákna ukládána do požadované tloušťky izolace. Takto je vyráběna např. izolace „Rotaflex“. Součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  izolací Rotaflex jsou v rozmezí 0,035 – 0,050 [W/mK]. K výhodám této izolace patří nehořlavost, výborné akustické vlastnosti, nepodléhá biologickému rozkladu a je odolná proti hlodavcům a hmyzu. Manipulace se skelnou vatou vyžaduje velkou opatrnost, protože ostrá a tenká vlákna snadno pronikají do kůže a způsobují bolestivé záněty. Výrobky této firmy se používají při izolování stejně jako „kamenná vlna“ [17].

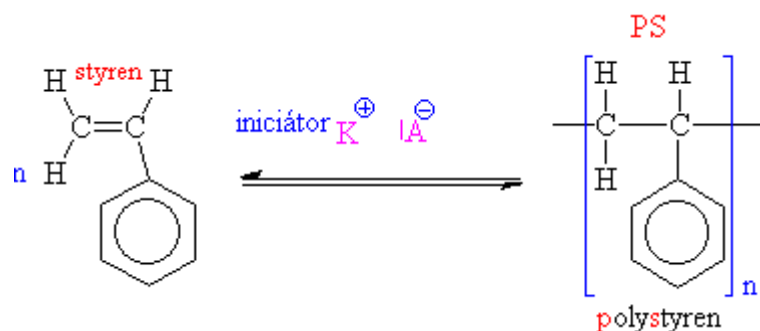
### *Pěnové sklo*

Výroba pěnového skla začíná rozmělněním střeptů plochého skla na mikroprášek, který se pomocí zpěňovacího činidla zpěňuje v železných formách a v průchodové plynové peci. Zpěněné bloky se chladí na pokojovou teplotu. Tyto bloky mají pravidelné neprodyšně uzavřené buňky. Buňky mohou být naplněny směsí různých plynů pro snížení tepelné vodivosti výrobku. Bloky pěnového skla se používají na izolování střech, stropů, stěn a podlah. Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  pěnového skla je 0,075 [W/mK]. Výhodami této stavební izolace jsou odolnosti proti plísním, houbám a mikroorganismům, dále je odolná proti chemikáliím a je nehořlavá. Nevýhodou izolace je její velká křehkost [18].

### *Polystyren*

Polystyren je jedním z nejlevnějších a nepoužívanějších izolačních materiálů, proti jeho použití však hovoří řada argumentů. Pěnový polystyren je velmi levný, ale může podléhat zkáze rychleji než samotná stavba. Je málo odolný proti vlhkosti a tlaku. Extrudovaný polystyren je oproti pěnovému dražší, ale odolnější.

Výroba polystyrenu velmi výrazně ovlivňuje životní prostředí ve všech svých fázích. Hlavní surovinou je ropa, která se složitou chemickou reakcí mění na styren (jedovatý karcinogen) a odpadní pentanové a styrenové emise. Polystyrén (též polyvinylbenzén) se vyrábí polymerací styrenu, - viz. obr. 1.



**Obr. 1:** Polymerace styrenu

Je to tuhá křehká hmota, v přirozeném stavu dokonale bezbarvá a průsvitná. Zpracovává se hlavně vstřikováním, ale také vytlačováním.

Základní surovinou pro výrobu pěnového polystyrenu je zpěňovatelný polystyren, který se připravuje polymerací styrenu, ve formě perlí, obsahující zpravidla 6 - 7% nadouvadla (pentan). V dalším procesu se materiál ohřeje v předpěňovacích kotlích, kde jeho hustota  $\rho$  klesne přibližně z  $630 \text{ kg/m}^3$  na hodnoty 9 až  $40 \text{ kg/m}^3$ , pak pokračuje zrání a stabilizace. K přednostem pěnového polystyrenu patří snadné zpracování a nízký součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , který se pohybuje v rozmezí  $0,035 - 0,045 \text{ [W/mK]}$ . Polystyren odolává minerálním a většině rostlinných olejů, zásadám a kyselinám (kromě kyseliny dusičné), alkoholům a dalším činidlům. Nevýhodou polystyrenu je malá odolnost vůči teple - jen do  $60 - 100^\circ\text{C}$  (podle zpracování) a jeho hořlavost [19].

### Polyuretan

Polyuretan je syntetický materiál s mimořádně dobrými izolačními vlastnostmi. Jeho výroba představuje pro životní prostředí velkou zátěž zejména kvůli vysoké energetické náročnosti zpracování ropy. Polyuretanové pěny se nejčastěji vyrábějí v nepřetržitě pracujících zpěňovacích strojích. Do míchací hlavy se přivádějí všechny složky (diizokyanát, polyhydroxysloučenina a voda), vysokoobrátkovým míchadlem se z nich vytvoří viskózní kapalina, která po nalití do forem vypění za běžných podmínek tak rychle, že po 10 – 20 minutách může být hmota z formy vyňata [20].

Měkké pěny se vyrábějí v rozmezí hustot  $\rho$  od  $15 - 70 \text{ kg/m}^3$ , tvrdé pěny se vyrábějí v ještě větším rozmezí hustot  $\rho$  od  $10 - 600 \text{ kg/m}^3$  [24]. Výhoda tohoto izolačního materiálu je jeho nízký součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , který se pohybuje kolem hodnoty  $0,03 \text{ [W/mK]}$ .

## *Rákos*

Rákos je tradičním přírodním stavebním materiálem s průměrnými izolačními vlastnostmi (součinitel tepelné vodivosti  $\lambda = 0,1 \text{ W/mK}$ ) [22], používaným na střechy i do zdí. Nespornou předností rákosu je, že patří podobně jako jiné rostlinné produkty k přírodním obnovitelným materiálům. Rákos se dříve používal jako podkladní vrstva omítky i jako střešní krytina, která se opět začíná používat u staveb ze dřeva. Základním úkolem každé krytiny je zajistit vodotěsnost. Ovlivňuje ji také minimální sklon střešních rovin, který se navrhuje podle druhu použitého materiálu. V nově vydané ČSN 73 1901:99 Navrhování střech je požadováno, aby střechy se skládanou krytinou z došků (slámy a rákosu) měly sklon alespoň  $45^\circ$ . Léty zkušeností bylo ověřeno, že při tloušťce 250 až 350 mm může rákosová krytina dlouhodobě úspěšně odolávat působení atmosférických vlivů. Pokud se rákos na střeše zabuduje v dostatečné tloušťce, do jisté míry vytvoří přirozenou tepelnou izolaci, protože jeho jednotlivá stébla, rozdělená kolínky, jsou v podstatě krátkými kapilárami, v nichž je uzavřen vzduch. Na starších stavbách bez vytápěných podkrovních místností nebylo třeba, aby krytina plnila i funkci tepelné ochrany. Dnes, při nutnosti splnění platných energetických požadavků podle ČSN 73 0540-2:1994 - Tepelná ochrana budov, je nutno střechu doplnit o tepelně izolační vrstvu (např. ovčí vlna u dřevostaveb) [21].

## *Ovčí vlna*

Ovčí vlna je izolačním materiálem ověřeným přírodou, a proto se pro izolaci domů dobře hodí. Kromě teploty reguluje i vlhkost a omezuje hluk. Z ekologického pohledu je to jeden z nejvýhodnějších izolačních materiálů. Z důvodu uvedeném v úvodu je předmětem studia této diplomové práce a její vlastnosti budou popsány detailně. Na české trhu je v současné době k dostání vlna tuzemská (z valašských ovcí) a také vlna pocházející z Austrálie a Nového Zélandu.

Ovčí vlna má výborné tepelně izolační vlastnosti, její součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  se pohybuje od  $0,039 - 0,049 \text{ W/mK}$ . Výhodou proti ostatním přírodním izolacím je její vyšší požární odolnost a odolnost proti biologickým škůdcům, která je zajišťována speciálními prostředky [22].

## 2.1 Ovčí vlna – charakteristické vlastnosti

Ovčí vlna je srst ovce domácí, která patří mezi první domestikovaná zvířata. Vlna se získává stříháním ovcí. V České republice se ovce stříhají jedenkrát do roka, ale např. v Africe se stříhají dvakrát ročně. Z jedné ovce lze získat cca 3 - 6 kg ovčího rouna. Rouno obsahuje různé jakosti vlny (nejkvalitnější vlas je na lopatkách a bocích ovce) a skládá se z 60% vláken, 5% nečistot, 15% vlhkosti, 10% tuku a 10% potu [1].

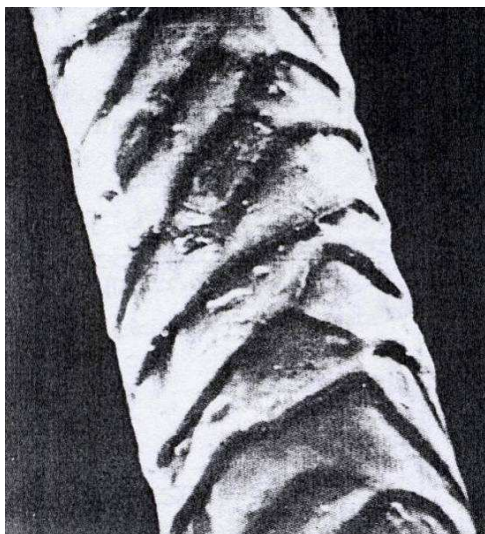
### 2.1.1 Nečistoty ve vlně

Vlna z ovčího rouna obsahuje kromě vláken značné množství nečistot jak organického původu (pot, močovina, tuk, rostlinné nečistoty z pastvišť, ustájení apod.), tak i původu anorganického (písek, prach) – viz. tab. 1, které je třeba před zpracováváním vlny odstranit [2].

**Tabulka č. 1** Nečistoty ve vlně a jejich odstranění

Nečistoty ve vlně	Způsob odstranění nečistot
Ovčí pot	Praní
Močovina	Praní
Ovčí tuk	Praní
Rostlinné zbytky	Karbonizace
Prach, trus, dehet	Praní, vytřásání

### 2.1.3 Morfologie

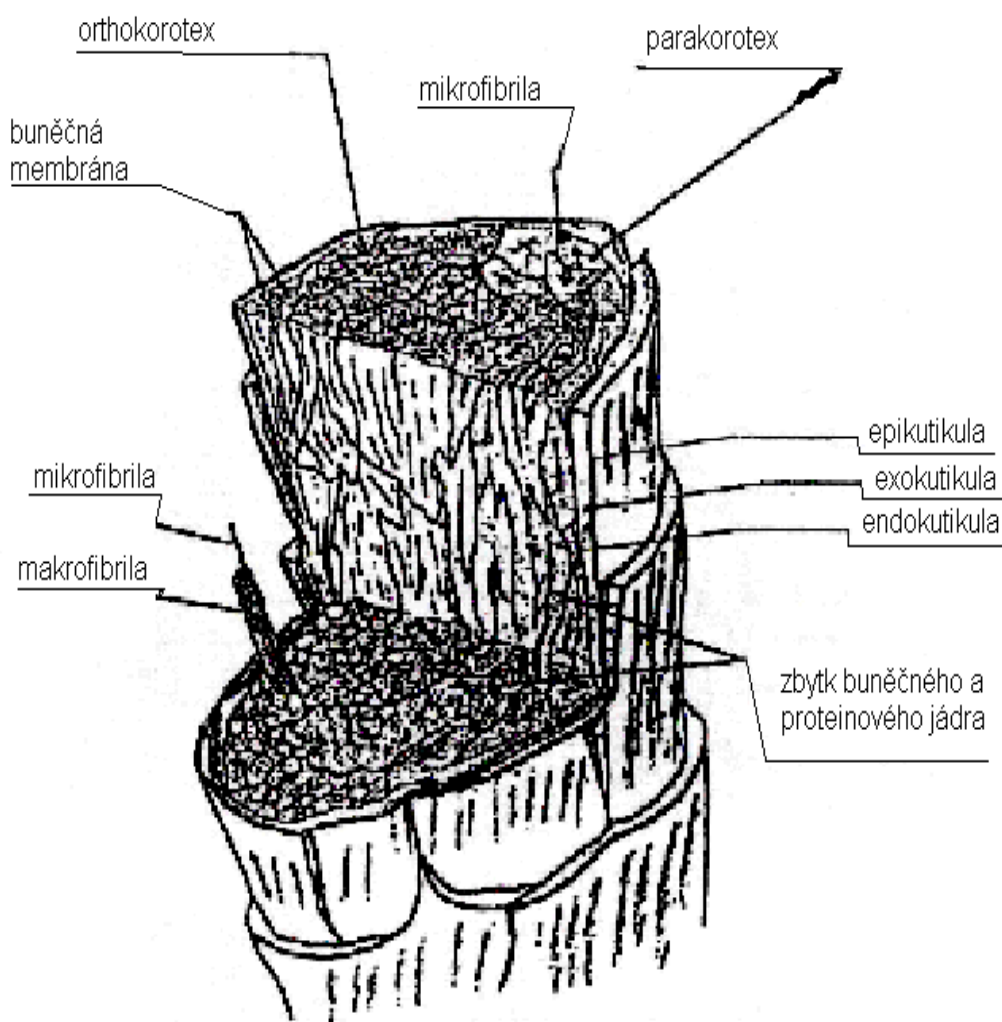


**Obr. 2** Kutikula a její šupinkovitý tvar.

Buněčná struktura vlny je na obr. 3. Skládá se ze tří oblastí: kutikuly, kortexu a meduly. Kutikula je membrána o průměrné tloušťce 0,7  $\mu\text{m}$ , která objímá vlněné vlákno a dodává mu důležité vlastnosti jako jsou hydrofobnost a povrchové tření. Geometrické uspořádání kutikuly, která je podél celého vlákna od kořínku až ke špičce ve tvaru šupinek, je na obr. 2.



Kortex je jádro vlákna a zastupuje 70 - 90% celé hmoty vlákna. Zodpovídá za jeho veškeré chemické a fyzikální vlastnosti. Vnitřní centrální dutina se nazývá medula. Její povrch tvoří buněčné stěny [2].



*Obr. 3 Morfologie vlněného vlákna.*

#### 2.1.4 Chemické složení vlny

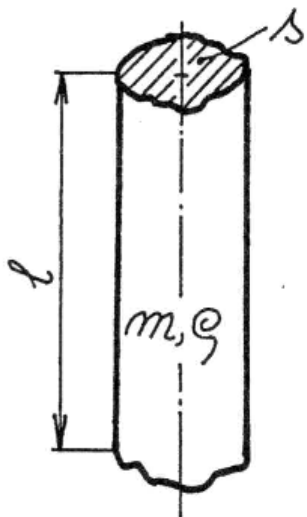
Vlna je keratoprotein, vyznačující se značnou odolností vůči chemickým a biochemickým vlivům. Jejím základním stavebním kamenem jsou aminokyseliny. Dvě aminokyseliny se mohou spojit peptidickou vazbou za vystoupení molekuly vody. Opakovaná kondenzace vede k tvorbě polypeptidických řetězců, které mohou být rovné

nebo nejruzněji zprohýbané. Řetězce mohou být mezi sebou vázány buď společnou molekulou aminokyseliny, vodíkovými můstky, nebo solnými vazbami. Jednotlivé aminokyseliny jsou ve vlně obsaženy v různém množství [2].

## 2.1.5 Mechanické vlastnosti vlny

### Jemnost

Jemnost je parametr relativní, takže se ho používá při porovnávání různých druhů vláken. Vyjadřuje se tzv. délkovou hmotností, tj. podílem hmotnosti vlákna ku jeho délce. Na obr. 4 je znázorněno vlákno délky  $l$  [km], jeho plocha příčného řezu je  $s$  [mm<sup>2</sup>], jeho hmotnost je  $m$  [g] a hustota  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>].



$$t = \frac{m}{l} = \frac{s l \rho}{l} = s \rho \quad [\text{tex}] \quad (1)$$

Při znalosti průměru  $d$  [mm] můžeme vypočítat jemnost, pokud známe hustotu vlákna  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] (v tabulkách) podle vztahu:

$$t = \frac{\pi \rho d^2}{4} \quad [\text{tex}] \quad (2)$$

**Obr. 4** Vlákno délky  $l$

V obchodě s vlnou se pracuje s obchodním značením jemnosti v Bradfordské stupnici, což je počet přaden po 560 yardech (yd) příze, které lze vypříst z jedné libry (lb) vlny (1 yd = 0,914 m, 1 lb = 0,453 kg) [23]. Příklady obchodního značení jsou v tab. 2.

**Tabulka 2** Příklady obchodního značení vlny

Označení vlny	Bradford stupeň [‘s]	Průměr vlákna [μm]	Délka vlny[cm]
Jemná (merino)	80 – 60	18,8 – 23,3	2,5 – 12
Střední (crossbred)	58 – 46	24,9 – 34,0	6 – 15
Hrubá (kobercová)	46 – 36	34,0 – 39,7	15 – 40

## **Pevnost**

Pevnost vláken se určuje za sucha a za mokra. V textilní praxi se jako pevnost za sucha označuje pevnost při 65% relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C. Pevnost za mokra pak udává pevnost vlákna se 100% vlhkostí. Vlna má pevnost za sucha 0,9 – 1,8 cN/dtex a za mokra 70 – 80% pevnosti za sucha [1].

## **Tažnost**

Tažnost je poměrné prodloužení vyjádřené v procentech původní délky, vlna má tažnost 20 – 35% za sucha a 25 – 50% za mokra.[1]

## **Pružnost**

Vlna při deformaci 2% má schopnost se vrátit do původního stavu z 99% a při deformaci 5% se vrátí do původního stavu z 55%.[1]

## **Měrná hmotnost**

Vlna má měrnou hmotnost (hustotu) 1320 kg/m<sup>3</sup>. [1]

### **2.1.6 Sorpční vlastnosti**

Ovčí vlna je při svém zpracování i upotřebení stále vystavována vlhkosti svého okolí. Vlněná vlákna přijímají vlhkost tak dlouho, až se ustaví rovnováha mezi obsahem vodní páry ve vláknech a obsahem vodní páry v okolním prostředí [2]. Vlhkost ovzduší se udává relativní vlhkostí  $\varphi$ , která se vyjadřuje v % a je dána vztahem:

$$\varphi = \frac{a}{a_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

kde  $a$  je absolutní vlhkost, tj. množství vodní páry v objemové jednotce vzduchu,  $a_n$  je absolutní vlhkost nasyceného vzduchu, tj. maximální množství vodní páry, které objemová jednotka vzduchu může pojmout, aniž dochází při dané teplotě ke kondenzaci vodní páry.

Vlhkost vláken  $\varphi_v$  se udává v % a je dána vztahem:

$$\varphi_v = \frac{m_v}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

kde  $m_v$  je hmotnost vody ve vzorku a  $m_s$  je hmotnost suchého vzorku.

Vlhkost vláken je velmi významnou veličinou, protože má vliv nejen na jejich zpracovatelnost, ale i na řadu dalších vlastností, např. tepelnou vodivost, pevnost, tažnost - viz. kap. 2.1.5. Příklady vlhkostí vlněných vláken při různých relativních vlhkostech okolí při 24 °C jsou uvedeny v tab. 3 [2].

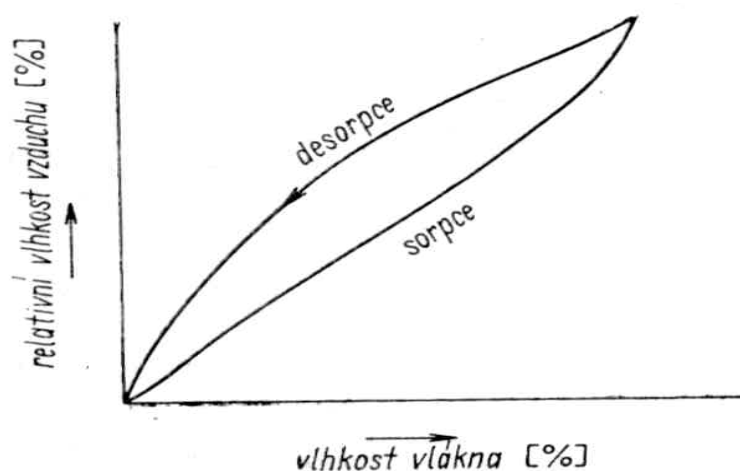
**Tabulka 3** Obsah vlhkosti ve vlně v závislosti na  $\varphi$  [%] vzduchu

Relativní vlhkost vzduchu $\varphi$ [%]	Vlhkost vláken vlny [%]
10	4,0
20	7,1
30	9,4
40	11,0
50	12,6
60	14,2
65	15,0
70	16,0
80	18,6
90	23,2

Vlhkost vláken je také důležitá pro obchodování a nazývá se uzanční vlhkost. Uzanční vlhkosti odpovídají přibližně vlhkostem vláken, které jsou v rovnováze s normální vlhkostí okolního vzduchu, což je 65% relativní vlhkost, při teplotě 20 °C. Uzanční vlhkost pro ovčí vlnu je 18 % [2].

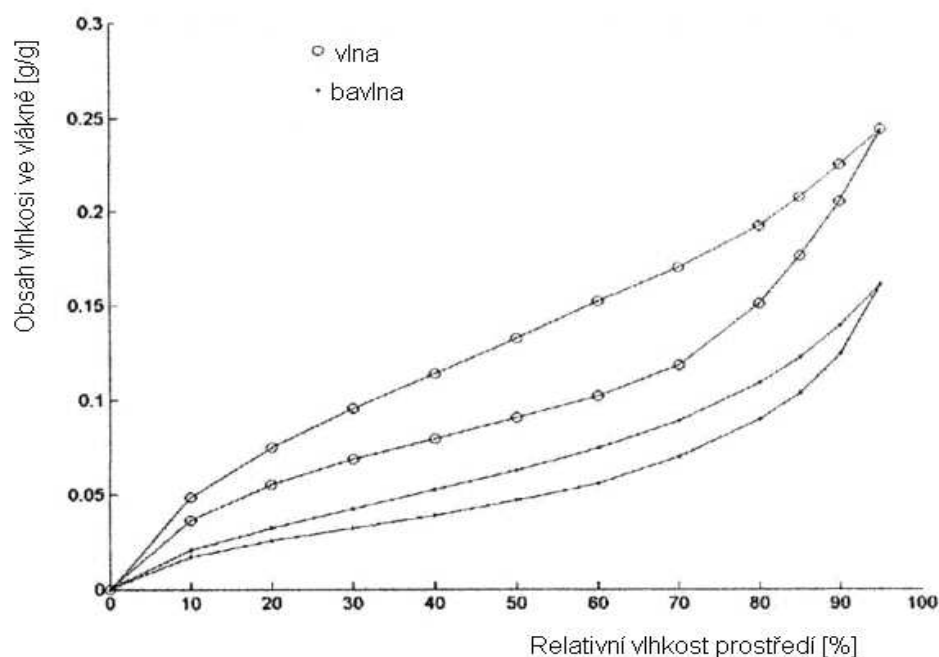
Sorpci vlhkosti ve vlněných vláknech podmiňují hydrofilní skupiny v makromolekule vlákna a jejich přístupnost pro molekuly vody. Vláknina proteinová (ovčí vlna, velbloudí srst, alpaka aj.) se skupinami -OH, -NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, -COO<sup>-</sup> a se skupinou -NH- v hlavním valenčním řetězci poskytují možnost značné sorpce vody. Sorpce vody u textilních

vláken se obecně neděje stále stejným mechanismem a je při různých vlhkostech okolí rozdílná, jak je zřejmé z obr. 5 [2].



**Obr. 5** Sorpce a desorpce textilních vláken

Vzniká tzv. hysterezi smyčka. Velikost této hysterezi smyčky závisí na typu a struktuře vlákna. Konkrétní naměřené křivky jsou na obr. 6,



**Obr. 6** Sorpční isotermy vlny a bavlny

kde jsou znázorněny sorpční isotermy vlněného výrobku a bavlněného výrobku. Sorpční isotermy byly měřeny přístrojem DVS 1000, který je založen na nastavení relativní vlhkosti prostředí pomocí dvou proudů dusíku (suchého a nasyceného vodou) [31].

Sorpce vlhkosti závisí také na teplotě. Vliv teploty na vlhkost ovčí vlny ukazuje tab. 4 [2].

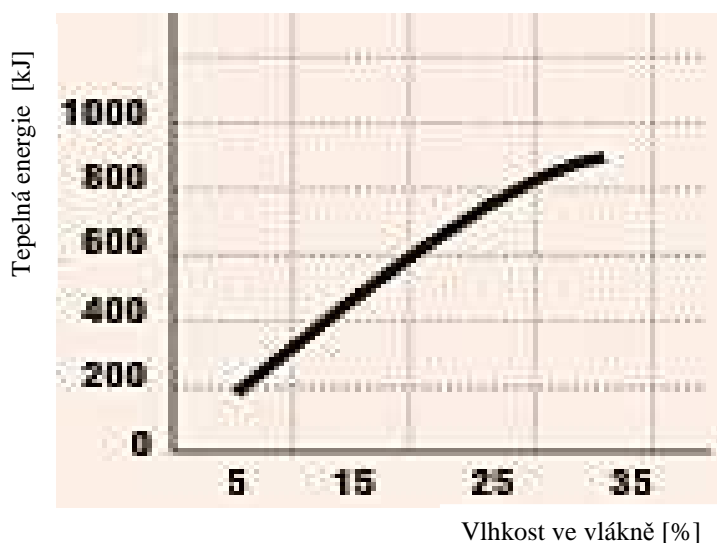
**Tabulka 4** Vliv teploty na vlhkost ovčí vlny při 70 % relativní vlhkosti vzduchu

Teplota [°C]	Vlhkost ovčí vlny [%]
-29	17
-18	18
4	17,5
35	15
71	13

### 2.1.7 Tepelné vlastnosti vlny – teplo sorpce

Když je molekula vody přitažena k polární straně, je zpomalena a uvolní energii ve formě tepla – exotermická reakce a mluvíme o „teplu sorpce“.

Tento proces neprobíhá lineárně – obr. 7. Čím sušší je vlněné vlákno, tím více vlhkosti může „přitáhnout“ a tím více tepla může být uvolněno. Jak se vnitřní „polární region“ zaplňuje, tím méně tepla se uvolňuje. Jestliže se okolní prostředí vysuší, „polární region“ uvolní molekuly vody, které odeberou



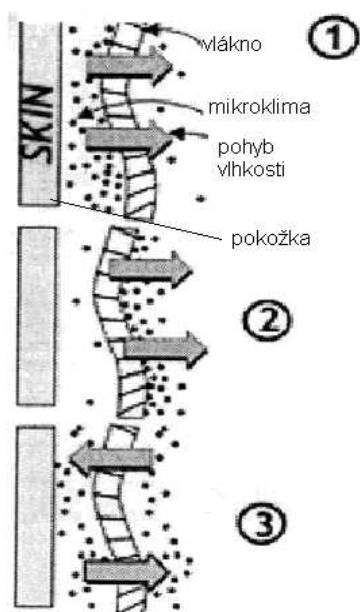
**Obr. 7** Uvolňování sorpčního tepla při sorpci vlhkosti ovčí vlny [34]

energii a uvolní se zpět do okolního prostředí – endotermická reakce (spotřebuje se teplo). Uvolní se pouze tolik páry, aby se ustanovila rovnováha. Vlněné vlákno může absorbovat vlhkost až do 35 % své váhy. To vše probíhá v poměrně krátké době. Bylo zjištěno [34], že závislost tepelného odporu R na čase probíhá podle obr. 8.



**Obr. 8** Změna tepelného odporu (vlněné izolace) na čase  $t$

Ve většině případů se prostředí mění a vlněné vlákno se snaží ustavit svou rovnováhu. Tím zpětně ovlivňuje prostředí, ve kterém se nachází.



**Obr. 9** Ustavení rovnováhy vlhkosti mezi vlněním vláknem a prostředím

Chování vlny v izolaci lze přirovnat k chování vlny v obleku. Literatura [34] vysvětluje zmíněné chování podle následujícího obr. 9.

Je-li obsah vlhkosti mikroklimatu vyšší než ve vnějším prostředí, vlněné vlákno absorbuje vlhkost z mikroklimatu (1) a uvolňuje ho do vnějšího prostředí (2) tak dlouho, až se ustaví rovnováha v obou prostředích (3).

Sorpce vody je jak již bylo uvedeno exotermický děj. Podle podmínek rozlišujeme sorpční teplo na diferenciální  $Q_d$  (teplo sorpce) a integrální  $Q_i$  (teplo smáčení). Diferenciální teplo  $Q_d$  je teplo uvolněné při sorpci vody na 1g suchého vlákna. Vyjadřuje se v J/g

(sorbované vody). Voda se může sorbovat z vodní páry  $Q_p$  nebo kapaliny  $Q_k$  (teplo bobtnání). Vývoj tepla se v těchto případech liší o latentní teplo vypařování  $L_v$  [J/g]. Z termodynamiky platí vztah:

$$Q_d = Q_k + L_v \quad [\text{J/g}] \quad (5)$$

Z tohoto vztahu je také možno diferenciální teplo sorpce vypočítat z tepla bobtnání. Obě tepla, jak  $Q_d$ , tak i  $Q_k$ , jsou těžko přístupná přímému měření. Proto se experimentálně měří integrální teplo sorpce  $Q_i$ . Z toho se pak vypočte diferenciální teplo vztahem:

$$Q_d = 100 \cdot \frac{dQ_i}{d\varphi_v} \quad [\text{J/g}] \quad (6)$$

kde  $\frac{dQ_i}{d\varphi_v}$  je změna integrálního tepla sorpce s vlhkostí  $\varphi_v$  (vlhkost  $\varphi_v$  je vyjádřena v %).

V praxi se měří integrální teplo sorpce při různých vlhkostech vlákna a z průběhu této závislosti se např. graficky zjišťuje diferenciální teplo sorpce [2].

Vlna díky své hydrofobnosti uvolňuje při sorpci vlhkosti sorpční teplo viz obr. 7. Pokud je vzduch nasycený vodní parou, ovčí vlna při sorpci této vlhkosti uvolní na jeden kilogram své hmotnosti (v suchém stavu) asi 960 kJ tepelné energie [13]. Toto uvolněné teplo je důležité pro prevenci kondenzace (srážení vody) v konstrukcích. Udrží teploty nad rosným bodem ve vlhkých obdobích roku či v situacích, kdy dochází ke zvýšenému vlhkostnímu zatížení [22].



### 3. Šíření tepla vlákennými materiály – základní pojmy

Přenos tepla je zprostředkovaný různými nosiči a různými fyzikálními mechanismy. Z tohoto hlediska dělíme termokinetické procesy na **vedení** (kondukce), **proudění** (konvekce) a **záření** (radiace) [4]. V reálných systémech probíhá přenos tepla všemi uvedenými způsoby.

Literatura [5] uvádí, že se teplo v textilních resp. vlákenných materiálech šíří pouze dvěma mechanismy, kondukcí (šíří se vlákny a také vzduchem uzavřeným v textilií) a zářením (do určité penetrační hloubky, než se veškeré teplo přemění v kondukci). Konvekce volná se ve vlákenných materiálech nevyskytuje. Pro konvekční přenos tepla vlákenným materiálem je zapotřebí, aby byly mezi vlákenné útvary (vzduchové póry) větší než 9 - 11 mm. Poté by tento přenos mohl být uskutečněn. Vlákná ve vlákenném materiálu s objemovou hmotností větší než  $20 \text{ kg.m}^{-3}$  rozdělí vzduch do velice malých pórů [6].

#### 3.1 Vedení tepla

Vedení je přenos tepla v prostředí, jehož částice se ve směru tepelného toku nepohybují. To platí vždy při látkách tuhého skupenství, ale také při laminárním proudění tekutin. Vedení z hlediska fyzikálního mechanismu má charakter mikroskopický. Z hlediska kinetické teorie látek jde o pohyb a nárazy molekul, při kterých se energie odevzdává z místa o vyšší hladině energie (vyšší teploty) na místo s nižší hladinou energie (nižší teploty). Nevyhnutnou podmínkou pro existenci vedení je existence tepelného spádu [4].

#### *Tepelná vodivost*

Tepelná vodivost  $\lambda$  [W/m.K] neboli součinitel tepelné vodivosti je vlastnost prostředí, která obecně závisí na teplotě, tlaku a složení systému. Vyjadřuje schopnost šíření tepelné energie pevným, kapalným nebo plynným prostředím bez proudění látky.

Tepelná vodivost  $\lambda$  je definována jako záporně vzatý podíl měrného tepelného toku  $q$  a gradientu teploty  $grad(T)$  [7]

$$\lambda = - \frac{q}{grad(T)} \quad [W/m.K] \quad (7)$$

Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  je charakteristická materiálová konstanta vyjadřující schopnost materiálu přenášet tepelnou energii vedením. Čím je tato hodnota vyšší, tím je vyšší schopnost materiálu vést teplo.

Tepelná vodivost textilních izolací závisí na materiálu vláken, na struktuře izolace, hustotě izolace, na vlhkosti a teplotě okolí.

### ***Teplo***

Teplo  $Q$  [J] je forma energie související s neuspořádaným pohybem částic dané soustavy. Není stavovou veličinou, poněvadž závisí nejen na počátečním a koncovém stavu, ale také na způsobu procesu („historii“). Dodáním (vylouením) tepla se mění teplota a s ní ostatní fyzikální vlastnosti (objem, tlak, elektrická vodivost) soustavy [4].

Teplo  $Q$ , které projde plochou  $A$  za dobu  $t$ , lze vypočítat podle vztahu:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot t \frac{(T_1 - T_2)}{h} \quad [J] \quad (8)$$

Množství tepla, které projde látkou, je tedy přímo úměrné době  $t$ , tepelné vodivosti materiálu  $\lambda$ , ploše  $A$  a rozdílu teplot povrchů materiálu  $(T_1 - T_2)$ . Nepřímo úměrné nejkratší vzdálenosti  $h$  povrchů.

### ***Fourierův zákon***

Základní zákon pro vedení tepla je Fourierův zákon pro výpočet tepelného toku  $q$ :

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda \cdot grad(T) \quad [W/m^2] \quad (9)$$

Znaménko mínus v rovnici (9) znamená, že vektor hustoty tepelného toku směřuje proti vektoru  $grad(T)$ . V souladu s druhým termodynamickým zákonem to znamená, že se teplo šíří od vyšší teploty k nižší [4].

Tato rovnice vyjadřuje množství tepla  $q$ , které v ustáleném stavu projde jednotkovým průřezem při jednotkovém teplotním gradientu za jednotku času. Po integraci dostáváme:

$$q = \frac{\lambda}{h} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{\lambda}{h} \Delta T \quad [\text{W/m}^2] \quad (10)$$

### ***Měrná tepelná kapacita***

Je teplo, které je nutné dodat 1 kg látky k ohřátí o 1 °K. Měrná tepelná kapacita (měrné teplo)  $c$  závisí na druhu látky a na teplotě [7]. Je definována vztahem:

$$c = m^{-1} \cdot \frac{dQ}{dT} \quad [\text{J/kg.K}] \quad (11)$$

$m$  je hmotnost látky [kg], která byla dodáním tepla  $dQ$  [J] ohřáta o teplotu  $dT$  [K].

### ***Teplotní vodivost***

Teplotní vodivost  $a$  vyjadřuje rychlost šíření tepla materiálem. S rostoucí rychlostí změny teploty materiálu roste i teplotní vodivost  $a$  [4]. Je dána vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (12)$$

Teplotní vodivost  $a$  je tedy ze vztahu (12) přímo úměrná tepelné vodivosti  $\lambda$  a nepřímo úměrná objemové tepelné kapacitě  $c \cdot \rho$  [J/m<sup>3</sup>.K].

### ***Gradient teploty***

Maximální přírůstek teploty  $T$  ve směru kolmém na izotermické plochy (ve směru normály) na jednotku délky je gradient teploty  $grad(T)$  [4] daný vztahem:

$$grad(T) = n_0 \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad [\text{K/m}] \quad (13)$$

kde:  $n_0$  - jednotkový vektor ve směru normály.

### ***Hustota tepelného toku***

Množství tepla, které projde v kolmém směru jednotkovou plochou za jednotku času je hustota tepelného toku  $q$  [4]

$$q = \frac{dQ}{dA} \quad [\text{W/m}^2] \quad (14)$$

Pokud je tepelný tok  $Q$  rovnoměrně rozložený na ploše  $A$ , je

$$q = \frac{Q}{A} \Rightarrow Q = A \cdot q \quad [\text{W}] \quad (15)$$

### ***Tepelný odpor***

Plošný tepelný odpor  $R$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ ] vyjadřuje reciprokou hodnotu množství tepla prošlého za jednotku času vrstvou materiálu o jednotkové ploše při jednotkovém teplotním spádu [4].

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{h}{\lambda} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}] \quad (16)$$

Tepelný odpor  $R$  materiálu je závislý na tloušťce textilie  $h$  [m] a tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W/m.K}$ ]. Izolační schopnost materiálu roste s rostoucí hodnotou tepelného odporu [8].

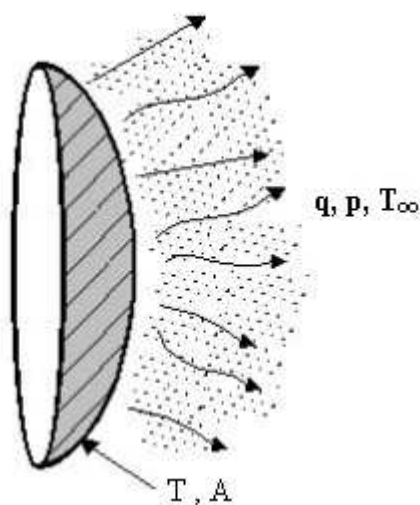
Tloušťka textilií je funkcí zatížení odolnosti vůči tlaku a souvisí s objemovou hmotností. Je to jeden z důležitých faktorů v oblasti stavebnictví, pro výpočet tloušťky izolace [26].

### 3.2 Proudění tepla

Teplo se šíří prouděním z pevného do okolního hmotného prostředí (kapalného nebo plynného). Podmínkou proudění je existence hmotného prostředí a teplotního spádu mezi povrchem tělesa a okolním prostředím [4]. Poté se částice látky, které mají určitou hladinu tepelné energie, pohybují do místa s odlišnou teplotou. Dojde k výměně tepla mezi částicemi a prostředím. Ohřejí-li se částice na vyšší teplotu, zmenší se jejich hustota tzn., že se stanou lehčími než prostředí a stoupají vzhůru. Částice odnášejí teplo, které přijaly ohřátím a opět toto teplo předávají chladnějším částicím. Chladnější částice naopak klesají do míst, kde se mohou ohřát [7].

Vyšším ohřevem částic se stane jejich proudění intenzivnější a množství přeneseného tepla bude také větší.

Pokud je proudění tepla vyvolané jen vnitřními zdroji (rozdílem měrných hmot v důsledku rozdílných teplot), mluvíme o volném proudění, respektive o přirozené konvekci. Je-li proudění urychlované vnějšími silami (např. ventilátor, čerpadlo, ...), jedná se o nucené proudění, resp. umělou konvekci. Z hlediska fyzikálního mechanismu má charakter makroskopický.



**Obr. 10** Proudění tepla

Tepelný tok (výkon) odvozený pro konvekci je

$$P = p \cdot A \cdot (T - T_{\infty}) = q \cdot A \quad [\text{W}] \quad (17)$$

$$q = p \cdot (T - T_{\infty}) \quad [\text{W/m}^2] \quad (18)$$

Kde:  $p$  - součinitel přestupu tepla prouděním  $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$ ,

$A$  - plocha tělesa přes kterou probíhá proudění  $[\text{m}^2]$ ,

$T$  - teplota povrchu ochlazovaného (ohřívaného) tělesa  $[\text{K}]$ ,

$T_{\infty}$  - teplota okolí  $[\text{K}]$ ,

$q$  - hustota tepelného toku  $[\text{W/m}^2]$ .

Součinitel přestupu tepla prouděním  $p$  je obvykle závislý na pracovní teplotě a na charakteru proudění okolního média.

Prouděním ve vláknenných materiálech se podrobně nezaobíráme, jelikož mezivláknenné póry jsou dostatečně malé a tudíž k volné konvekci dle literatury [6, 10] nedochází.

### 3.3 Záření tepla

Při sdílení tepla zářením (sáláním) je energie předávána prostorem formou elektromagnetického vlnění, které se může měnit na tepelnou energii. Svůj původ má v přívodu energie nebo ve vybuzení (excitaci) částice. Pohyb elektromagnetické vlny prostředím je výsledkem vzájemného silového působení částic prostředí na sebe navzájem. Záření není závislé na teplotě prostředí, jímž prochází, ale je závislé na teplotě povrchu tělesa, které tepelné vlnění vyzařuje.

K vysvětlení se využívá představy, že na povrchu zářícího tělesa je velký počet malých oscilátorů kmitajících v hmotném prostředí, které rozkmitávají své okolí. Rozkmitané nejbližší okolí předává kmitání dalšímu okolí (rozkmitává další okolí) a oscilace se začnou hmotným prostředím obklopujícím oscilátor šířit. Tak vzniká vlnění respektive vlna [3].

Veškeré látky s teplotou vyšší než absolutní nula ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) vysílají do svého okolí sálavé tepelné paprsky. Paprsky se šíří prostorem přímočaře. Látky jimiž procházejí

beze změny, nazýváme průteplivými. Ostatní látky, které sálavé paprsky odrážejí nebo pohlcují, nazýváme neprůteplivými. Tepelné záření má délku vlny v mezích  $0,8 \cdot 10^{-6} < \lambda \text{ [m]} < 0,8 \cdot 10^{-3}$ . Elektromagnetické záření vydávají látky všech skupenství [24].

K charakterizaci radiace mohou být použity tři parametry. Jsou to frekvence  $\nu$ , vlnová délka světla  $\lambda_s$ , a rychlost  $c$  vlny nebo fotonu. Z těchto jsou jen dva nezávislé, platí pro ně vztah (19) [4]:

$$c = \lambda_s \cdot \nu \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$

Sálání tepla souvisí s elektromagnetickým vlněním o vlnové délce (10-340)  $\mu\text{m}$ , není podmíněno přítomností prostředí, v němž se vlnění šíří, ale je prostředím postupně pohlcováno [3].

## 4. Vliv parametrů textilie na tepelnou vodivost $\lambda$

U vlákných izolačních materiálů se tepelná vodivost mění, jak bylo zjištěno, v závislosti na objemové hmotnosti, na směru toku tepla izolací, na velikosti a uspořádání pórů, jemnosti vláken, dále pak na teplotě okolí a obsahu vlhkosti v izolaci [9].

### 4.1 Vliv velikosti a množství pórů

Vzduch jako dobrý tepelný izolant má nízkou tepelnou vodivost -  $\lambda_{\text{vzduchu}} = 0,0264$  W/m.K, tepelné vodivosti vláken jsou určitě vyšší. Z toho lze usuzovat na fakt, že vzduch v izolaci zlepšuje její izolační schopnost.

Tepelná vodivost v izolaci s více póry je z pohledu kondukce nižší do okamžiku, než dojde k proudění v pórech. Naopak je tomu u šíření tepla zářením (radiace). Bylo zjištěno, že se tepelná vodivost  $\lambda$  se s velikostí pórů zvětšuje [9]. Poměr vláken a vzduchu v textiliích nám udává zaplnění  $\mu$  vláknenného útvaru, které je tím větší, čím jsou menší póry a více vláken v textiliích.

### 4.2 Vliv zaplnění a hustoty (objemové hmotnosti)

Hodnota zaplnění  $\mu$  vyjadřuje hustotu vláken ve vláknenném útvaru. Je definována jako podíl celkového prostoru útvaru, který je zaplněn objemem vláken [23].

$$\mu = \frac{V_v}{V_c} = \frac{\gamma}{\rho} \quad [1] \quad (20)$$

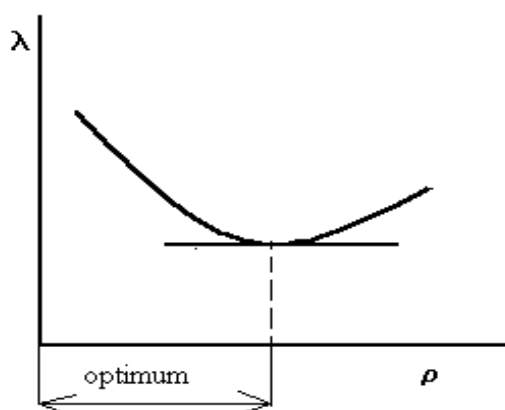
Kde  $V$  je objem vláken v útvaru [ $\text{m}^3$ ],  $V_c$  je celkový objem [ $\text{m}^3$ ],  $\gamma$  je měrná hmotnost vláken [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] a  $\rho$  je měrná hmotnost textilie [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Na zaplnění  $\mu$  závisí podíl textilie připadající na mezi vláknenné prostory. Ten ovlivňuje tepelně izolační vlastnosti textilií. Schopnost izolovat závisí na počtu, tvaru a velikosti vzduchových pórů, a tím na uložení vláken v prostoru. To lze ovlivnit parametry vláken a technologií zpracování.



S klesajícím zaplněním  $\mu$  klesá tepelná vodivost  $\lambda$  a roste tepelný odpor  $R$ . Důležitým předpokladem je suchý stav textilie a uzavřené vzduchové prostory. Pak se na přenosu tepla podílí pouze záření (radiace) a vedení tepla (kondukce) soustavou vlákno-vzduch. Stacionární vzduch v pórech je velmi dobrým izolátorem (viz 4.1) [16].

Obecně je známo, že vlákenné materiály mají při malé hustotě  $\rho$  tepelnou vodivost  $\lambda$  vyšší. S rostoucí hustotou  $\rho$  jejich tepelná vodivost  $\lambda$  klesá až na určité minimum a pak znovu roste, jak je znázorněno na obr. 11 [9]. Minimum tepelné vodivosti  $\lambda$  ukazuje na nejvýhodnější hustotu  $\rho$  izolace (viz. hypotéza v úvodu práce).



**Obr. 11** Vliv objemové hmotnosti vlákenných útvarů na tepelnou vodivost  $\lambda$

### 4.3 Vliv vlhkosti

Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost  $\lambda$  je velmi nepříznivý. S vlhkostí roste tepelná vodivost  $\lambda$ . Množství vody v izolační hmotě je ovšem různé a je závislé na látce, jež byla k výrobě izolace použita, dále na struktuře výrobku, poměru tlakových a teplotních apod. [9]. Je-li bráno v úvahu, že  $\lambda_{\text{vzduchu}} = 0,0264 \text{ W/m.K}$  a  $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,598 \text{ W/m.K}$ , pak má voda 23krát větší tepelnou vodivost než vzduch v klidném stavu při 20°C. Vodou nasycený pór teoreticky představuje tepelný můstek, kde nic nebrání přenosu tepla, nejvíce kondukcí [16]. V tomto případě je pak tepelná vodivost samotných vláken zanedbatelná a lze uvažovat pouze tepelnou vodivost vody.

### 4.4 Vliv jemnosti vláken

Jemnější vlákna zaplní izolaci „více“ než vlákna hrubší. Bylo zjištěno, že jemnější vlákna zajišťují větší měrný povrch izolace a opticky hustší prostředí. Zajišťují tak vyšší

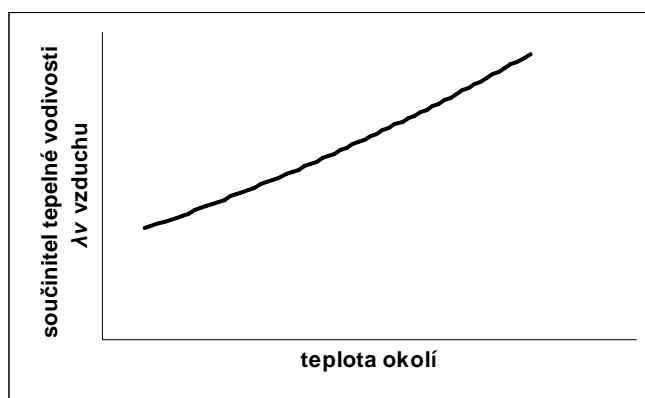
odpor izolace vůči prostupu infračervených paprsků. Právě touto okolností lze vysvětlit lepší tepelně izolační vlastnosti výrobků z jemnějších vláken. Konduktivní tepelná vodivost na jemnosti vláken prakticky nezávisí [25].

#### 4.5 Vliv směru toku tepla

Při toku tepla ve směru vláken je tepelná vodivost izolace  $\lambda$  vyšší, protože tok tepla souběžně uspořádanými vlákny v izolaci není přerušován vzduchovými mezerami, jako je tomu při průchodu tepla kolmo k vláknům [9].

#### 4.6 Vliv teploty okolí

Vzduch uzavřený v pórech izolačních materiálů je rozhodující pro izolační vlastnosti. Tepelná vodivost vzduchu  $\lambda_v$  roste s teplotou, jak je patrné z obr. 12.



**Obr. 12** Závislost tepelné vodivosti vzduchu  $\lambda_v$  na teplotě okolí

Z obr. 12 vyplývá, že izolace mění svou tepelnou vodivost  $\lambda$  s teplotou okolí. Když se teplota okolí zvyšuje, zvyšuje se i tepelná vodivost  $\lambda$  izolace [9].

## 5. Požadavky na stavební izolace

Stavební požadavky jsou vyžadovány stavebním zákonem prostřednictvím prováděcí vyhlášky MMR 137/1998 Sb. o obecných technických požadavcích na výstavbu. Těmito požadavky jsou mechanická odolnost, požární bezpečnost, ochrana zdraví, zdravých životních podmínek a životního prostředí, ochrana proti hluku, bezpečnost při užívání, úspora energie a tepelná ochrana. Dále se ve vyhlášce popisují jednotlivé požadavky na stavby a konstrukce (tedy i na jejich zateplení) v návaznosti na normové požadavky [26].

Požadavky tepelné ochrany budov jsou velmi obsáhlé, a proto uvádím jen příklady. Jedním z požadavků je nejnižší povrchová teplota konstrukce. Je dána normou - teplota stěn, stropů a podlah musí být v každém místě konstrukce bezpečně nad teplotou rosného bodu. Odpor a součinitel prostupu tepla musí být na úrovni požadovaných normových hodnot. Kondenzace vodních par v konstrukci je přímo vyloučena. Musí být zaručena tepelná stabilita místností. V zimním období v obytných místnostech i na konci otopné přestávky nesmí poklesnout výsledná teplota o více než 3 až 4°C a o více než 6 až 8°C v místnostech bez stálého pobytu lidí. V letním období nesmí dojít k vzestupu teploty vzduchu v místnosti o více než 5°C až 7,3°C. Dalším požadavkem je celková tepelná charakteristika budovy, která musí být nižší než požadovaná či doporučená normová hodnota [26].

Požární požadavky na tepelné izolace souvisejí se stupněm hořlavosti použitých izolací.

Stavební izolace se z hlediska hořlavosti dělí do skupin podle ČSN 730862:

- A – nehořlavé
- B – nesnadno hořlavé
- C – hořlavé

Skupina C se dále dělí na C1 – těžce hořlavé, C2 – středně hořlavé a C3 – lehce hořlavé.

Pro neobytné a jiné nevýrobní budovy s výškou do 9 m nejsou stanoveny žádné požární požadavky na vnější zateplovací systém, u vyšších budov do 22,5 m je v zateplovacích systémech povoleno užití i těžce hořlavých tepelných izolací se stupněm hořlavosti C1. Nad výšku 22,5 m jsou povoleny nesnadno hořlavé tepelné izolace se stupněm hořlavosti B, nikoliv však plasty. Požární požadavky k zateplení vnitřních konstrukcí

zní, že na podhled stropů a střech se nesmí použít hmot, které při hoření odkapávají. Uvnitř únikových cest jsou povoleny materiály s hořlavostí B [26].

Další požadavky kladené na tepelně izolační výrobky ve stavebnictví jsou např.:

- Odolnost proti hmyzu, např. molům u vlněné izolace a hlodavcům
- Odolnost proti vodě, hnití
- Odolnost proti mezi vlákně sorpci
- Odolnost tlaku

Proto jsou izolační výrobky, resp. materiály, k jejich výrobě upravovány různými prostředky, které požadované vlastnosti zajišťují.

## **5.1 Tepelně izolační výrobky**

Tepelně izolační výrobky musí proto splňovat mnoho různých podmínek. Výpočtové hodnoty mnoha materiálů se nacházejí v ČSN 730504. Pro výpočet jsou používány parametry výrobku udávané výrobcem. Pokud tyto hodnoty nejsou uvedeny v certifikátu, je doporučeno od použití tohoto výrobku ustoupit. Pokud mluvíme o tepelně izolačním výrobku pak by měl být jeho součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  maximálně do 0,15 W/mK. Z definice je zřejmé, že čím je menší součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , tím je výrobek vhodnější pro zateplování a může být použit v menších tloušťkách. Existuje mnoho způsobů rozdělení výrobků tepelných izolací, např. podle jejich chemického složení nebo podle jejich technických vlastností. Obvykle se člení podle tvaru (formy) výrobku, např. rohože, plst, desky a další izolační výrobky [27].

### ***Tepelně izolační desky***

Velikou výhodou desek s porovnáním s rohožemi a pásy z plstí je jejich vysoká stabilita a jejich vyšší pevnost v tlaku. Existují desky, které vyžadují krycí vrstvy, ale existují i desky, které slouží zároveň jako nášlapná vrstva nebo podklad pod omítku. Velmi často jsou používány sendvičové desky vyrobené z různých materiálů viz. kap. 3, které dominují svými specifickými výhodami.

### ***Rohože a plsti***

Tyto materiály jsou velmi oblíbené pro jejich dobré izolační vlastnosti a dobrou práci s nimi. Jsou často velmi lehké, a proto se jejich použití obvykle orientuje pro tepelnou izolaci střech, ale i ve speciálních úpravách jako izolace proti kročejového hluku apod. Lze je rozdělit podle původu suroviny na minerální, rostlinné a živočišné izolační materiály. Je jich mnoho různých provedení např. plst kaširovaná hliníkem, izolační klíny nebo samolepící plst. Jejich ceny jsou různé podle použití izolačního materiálu. Rohože a plsti z minerální vlny se často pohybují mezi nejlevnějšími izolanty, zatímco rostlinné a živočišné produkty jsou o něco dražší.

### ***Ostatní izolační výrobky***

Do této skupiny izolantů patří hlavně dodatečné izolační materiály, které se často používají společně s deskami nebo rohožemi. Lze sem zahrnout omítky, těsnící přípravky a nátěry, ale i stavební papíry a fólie.

## **5.1.1 Třídy (skupiny) izolací**

Izolace se řadí do tříd (skupin) podle své tepelné vodivosti  $\lambda$  [17]. Hodnota tepelné vodivosti  $\lambda$  je kritériem pro zařazení do určité třídy (skupiny). Třídy (skupiny) jsou označovány třemi čísly, např. 035, 040, 045, 050. Toto číslo vyjadřuje maximální tepelnou vodivost  $\lambda$  izolace v jednotkách W/mK. Interval každé třídy (skupiny) je 0,005 W/mK. Např. do třídy (skupiny) 040 spadají izolace s tepelnou vodivostí  $\lambda$  v intervalu 0,0351 – 0,04 W/mK.

## **5.2 Porovnání parametrů vybraných stavebních materiálů**

Srovnání tepelně izolačních parametrů jednotlivých stavebních materiálů je v tabulce 6. Z tabulky 6 vyplývá, že pouhý 1 cm ovčí vlny izoluje stejně jako 20 cm plné cihly [11], výpočet viz kap. 4.1 (15).

**Tab. 6** Srovnání tepelné vodivosti  $\lambda$  vybraných stavebních materiálů

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ vybraných materiálů [W/mK]	Tloušťka materiálu se stejným tepelným odporem R
Železobeton	1,40 W/mK	35 cm
Plná cihla	0,80 W/mK	20 cm
Děrovaná cihla	0,35 W/mK	9 cm
Dřevo	0,15 W/mK	4 cm
Ovčí vlna	0,04 W/mK	1 cm
Minerální izolace	0,04 W/mK	1 cm

### 5.2.1 Porovnání parametrů vybraných výrobků stavebních izolací

Srovnání výrobků nejčastěji používaných stavebních izolací je uvedeno v tabulce 7.

**Tab. 7** Parametry vybraných výrobků tepelných izolací

Výrobek izolace	Tepelná vodivost $\lambda$ [w/m.K]	Hustota [kg/m³]	Skupina hořlavosti	Teplota destrukce [°C]	Odolnost proti vodě	Odolnost proti hmyzu	Odolnost proti hlodavcům
Sheepwool	0,037	25	B	560	částečně	po ošetření ano	ano
KP 01 rotaflex	0,038	27	A	>1000	hydrofobizována	ano	ne
Rollrock rockwool	0,039	40	A	>1000	hydrofobizována	ano	ne
Domo isover	0,04	35	A	>1000	hydrofobizována	ano	ne
Pěnový polystyren	0,043	20	C3	80	částečně	ano	ano

## 5.3 Jevy ovlivňující tepelné vlastnosti staveb

### Difúze vodních par

Jedním ze sledovaných jevů nejen při zateplení staveb je difúze vodních par. Vodní páry vždy pronikají stavební konstrukcí. Vodní pára má snahu vždy zaujmout veškerý dostupný prostor, což je samozřejmě vlastnost každého plynu. Například když je v místnosti 20 °C a relativní vlhkost se pohybuje okolo 60% (11 g vody na m<sup>3</sup>) a venku je například v zimě -15°C a relativní vlhkost 86% (1g vody na m<sup>3</sup>), má vodní pára

tendenci proniknout z interiéru do exteriéru. To je často příčinou velkých tlaků, kterými se snaží proniknou pára konstrukcí. Pokud teplota v konstrukci poklesne pod hodnotu rosného bodu, dojde ke kondenzaci vodní páry v konstrukci, což může vést u dřevěných částí staveb k hnilobě, u kovových ke korozi a u ostatních k porušení mrazem [26].

### ***Infiltrace (vlhkosti, vzduchu)***

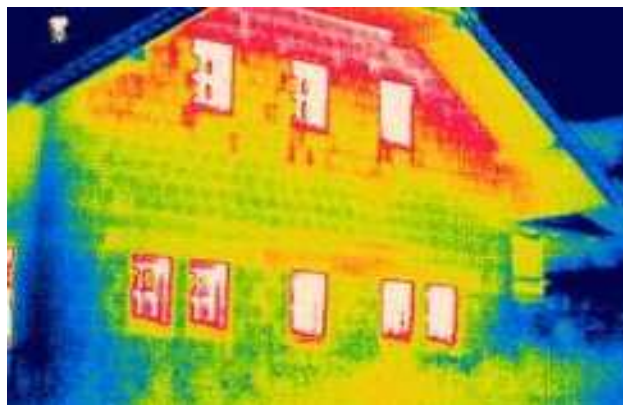
Dalším vlivem, který ovlivňuje tepelné vlastnosti budovy je infiltrace, resp. pronikání, prosakování, dýchání. Ve stavební praxi je brána jako pronikání vzduchu netěsnostmi. Tyto netěsnosti mohou být například mezery mezi okny a ostěním. Mohou to být také netěsnosti mezi panely nebo mezery mezi jednotlivými tepelnými deskami. Díky infiltraci často dochází k velkým tepelným ztrátám vlivem průniku studeného vzduchu, který musí být následně ohřát. K eliminaci těchto spár existují různé plasty nebo často používané polyuretanové pěny. Není vždy účelné (ani možné) všechny netěsnosti utěsnit. Podle hygienické normy musí docházet v místnosti k určité výměně vzduchu, kterou často zajišťují tyto spáry [26].

### ***Akumulace tepla***

Je to schopnost materiálu teplo pohltit, nebo ho následně vydat. Je doloženo, že v našich klimatických podmínkách lze využitím tepelné akumulace budov zajistit až 15% úspor tepla na vytápění oproti budovám bez tepelné akumulace. Často při vnitřním zateplení dochází k odclonění akumulační schopnosti materiálu pod izolací [26].

### ***Tepelné mosty***

Tepelný most je místo, kde dochází ke zvýšenému tepelnému toku. Uniká jím více tepelné energie a má v interiéru studenější povrch a naopak v exteriéru teplejší povrch než okolní konstrukce. Tepelné mosty dokumentuje např. obr. 13, který byl pořízen sdružením Energy Consulting [30].



***Obr. 13 Termogram***

Z obr. 13 je patrné, že tepelné mosty (červená barva) jsou mezi jednotlivými tvárnicemi, také nad okny a především ve štítu pod střechou, kde není izolace.

Tepelné mosty mohou být lineární, což je příklad třeba osazení okna do stěny (těmto tepelným mostům se také říká tepelné vazby, neboť se jedná o styk - vazbu - dvou různých konstrukcí) nebo například krokv při zateplování podkrovní. Nebo mohou být bodové, což může například být kotevní hmoždinka zateplovacího systému s kovovým trnem. Tepelné mosty mohou vznikat nejen vedením tepla, méně izolačními materiály, jak je uvedeno v předchozím odstavci, ale mohou také vznikat například prouděním vzduchu, tedy infiltrací vzduchu, popřípadě prouděním vzduchu z exteriéru mezi konstrukci, tedy například mezi tepelnou izolací a vnitřní povrch provedený ze sádkokartonu [30].

Statiku staveb ohrožují tepelné mosty tím, že způsobují kondenzaci vodní páry v konstrukci, což může vést u dřevěných částí staveb k hnilobě, u kovových ke korozi a u ostatních k porušení mrazem [30].



## 6. Stavební izolace z vlněného vlákna

Jak již bylo v úvodu zmíněno, v současné době se na trhu stále více objevují izolace z vlněného vlákna. Jsou provázena různými reklamními materiály, jejichž pravdivost není vždy podložena argumenty. Tento fakt vedl k zadání této diplomové práce.

Ovčí vlákno má důmyslnou stavbu viz kap. 2.1.3 a nelze ho dosud žádnou „technologií“ vyrobit. Je známo, že většina používaných izolačních materiálů včetně ovčí vlny má přibližně stejnou tepelnou vodivost  $\lambda$  0,04 W/mK (u izolace ovčí vlny se uvádí i 0,0354 W/mK [17]). Jak již také bylo zmíněno, zpracování ovčí vlny vyžaduje pouze 15% energetických nákladů v porovnání s výrobou minerálních izolací. Nevýhodou ovčí vlny proti minerálním izolacím však je vyšší stupeň „hořlavosti“. Patří do třídy hořlavosti B (zápalná teplota 560 °C) dle DIN4102 na rozdíl od minerálních izolací (patřících do třídy A). Izolace z ovčí vlny byla však schválena EN ISO 11925-2 testem samozhášlivosti.[14]. Ovčí vlna má však řadu dalších pozitivních vlastností, např. přijímá (sorbuje), ale i ochotně uvolňuje (desorbuje) vlhkost (viz. kap. 2.1.6), odpuzuje hlodavce, při manipulaci není potřeba ochranných pomůcek. Ovčí vlna musí být ošetřena proti molům.

### 6.1 Obecný postup výroby izolace z vlny

Balík zhutněné vlny potřebně upravené (vypraná a ošetřená proti molům) se otevře a vloží do podávacího stroje, kterým je vlna transportována do rozvolňovacího stroje. Zde se rozvolní, vyčistí a transportuje k podávacímu ustrojí mykacího stroje. Produktem mykání je vlákenná pavučina, která je snímána na dopravník a vedena ke zhušťovacímu zařízení, kde je formována na určitou tloušťku a hustotu. Následuje fixace (mechanická nebo tepelná).

### 6.2 Parametry a vlastnosti vlněné izolace

V dnešní době se vyrábějí vlněné izolace o hustotě 12 – 15 kg/m<sup>3</sup>. Izolace je vyráběna v pásech o délce 10 m, šířce 0,82 m a tloušťce 40 mm. Výhodou izolace z vlněného vlákna je její hydroskopičnost (viz. kap. 2.1.6) – Díky tomu může pohltit vodu z případné kondenzace vody v izolaci, ke které může dojít za nepříznivých tepelných podmínek (kap. 5.3), aniž dojde ke stékání vlhkosti ve formě kapaliny a ke

znehodnocení tepelně izolačních vlastností [22]. Při sorpci vlhkosti dochází k uvolňování tepla (kap. 2.1.7). Tento efekt má za následek snížení tepelných toků z budovy. Zmíněný jev může zvýšit v exponovaných podmínkách teploty v interiéru až o 4 °C v porovnání s budovami, které jsou izolované jinak stejně tlustou vrstvou tepelné izolace z alternativních materiálů. Naopak v létě vlna ochotně uvolňuje vlhkost díky vzrůstající venkovní teplotě, která vlnu ohřívá. Uvolněná vlhkost má za následek spotřebu tepla na výpar, tedy vlastně ochlazení stěny. Výsledkem je zmenšení tepelných toků do budovy. Tento jev může snížit v exponovaných podmínkách teploty v interiéru až o 7 °C v porovnání s budovami, které jsou izolované jinak stejně tlustou vrstvou tepelné izolace z alternativních materiálů. Díky těmto vlastnostem je vlna ideální pro izolace podkrovních prostor u střechy a dále pro dřevěné konstrukce staveb. Umožňuje navrhnout difuzně otevřené (dýchací) obvodové stěny nebo střechy a vyhnout se tak rizikům zkondenzované vlhkosti. Kromě toho může ovčí vlna fungovat jako významný stabilizátor úrovně vlhkosti v interiéru objektu. Pokud je v interiéru příliš suchý vzduch, uvolňuje se vlhkost z vlny a vzduch se „sytí“, a naopak pokud je vzduch v interiéru vodou příliš nasycen, vlna jej pohlcuje [22].

### **6.3 Metody a způsoby měření součinitele tepelné vodivosti $\lambda$**

Znalost součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  izolačních materiálů je velmi důležitá. Na základě měření je možné optimalizovat parametry tepelné izolace. Výsledkem optimalizace by pak mělo být zvýšení kvality izolace, a tím i zvýšením celospolečenských úspor (snížení množství energie potřebné pro vytápění) a možnost cíleného konstruování těchto materiálů. Z naměřených dat lze také určit optimální tloušťku izolace pro konkrétní stavbu.

Principem všech metod měření součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  je přivedení tepla k materiálu, průchod a odvod tepla zkoumaným materiálem. Měření se provádí za konstantního (stacionárního) nebo proměnlivého (nestacionárního) stavu, tj. tepelný tok a tedy i teplota se v závislosti na čase nemění nebo mění. Měření za stacionárního stavu je obecně spolehlivější a výsledky takto získané jsou přesnější. Nevýhodou je příliš dlouhá doba stabilizace tepelného toku.

Nejznámější metody pro zjišťování součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  při ustáleném stavu jsou dle ČSN:

- Metoda válce: přístroj Poegenové a Bockové ČSN 72 70 11

Metodou válce se měří vzorky výrobků (např. skruže, provazce) určených k tepelné izolaci jiných než rovinných povrchů.

- Metoda desková: přístroj Van Rinsunův ČSN 72 70 12

Metodou deskovou se měří vzorky výrobků (např. desky, pásy) určené k tepelné izolaci rovinných povrchů.

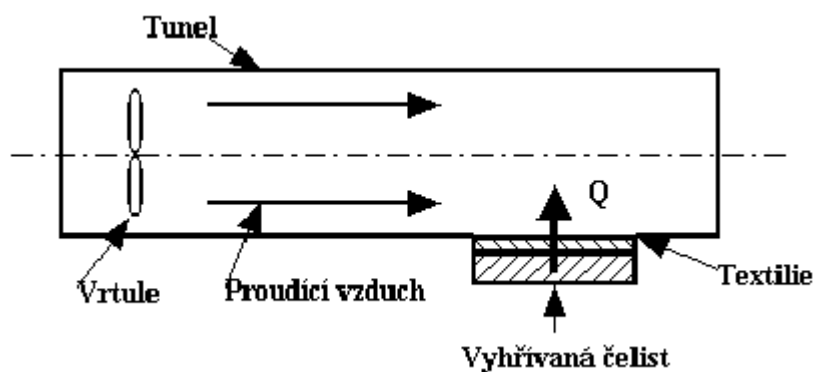
- Metoda koule: přístroj Nuseltův ČSN 72 70 13

Metodou koule se měří vzorky výrobků zrnitých, sypkých, vláknitých a jiných beztvarych výrobků a surovin.

Jde o metody časově náročné.

Mezi časově méně náročné metody patří měření na přístrojích, např.:

- Metoda měření na přístroji **TP – 2** je založena na registraci množství energie, kterou je nutno dodat vzorku, aby byl realizován stacionární tepelný tok. Vzorek textilie je umístěn na vyhřívané čelisti ve vzduchovém tunelu (viz obr. 14), kterým proudí vzduch rychlostí 3 m.s<sup>-1</sup>. Po ustálení tepelného toku se odečte množství energie, které je nutno dodávat do vyhřívané čelisti [32].



*Obr. 14 Schéma přístroje TP – 2*

- Metoda měření na přístroji **ALAMBETA**, který pracuje rovněž na principu vyhřívané čelisti, na kterou je položena měřená textilie. Na textilií dosedá měřicí čelist. Přístroj podává informace o tepelné propustnosti, tloušťce materiálu, tepelné vodivosti a teplotní vodivosti [27].
- Metoda měření na přístroji **Shotherm**, který využívá nestacionárního tepelného režimu, tzv. metody horkého drátu, součinitel tepelné vodivosti stanoví za cca 60 sekund. Vzhledem k tomu, že vzorek je podroben ohřevu jen krátkodobě, je schopen stanovit i součinitel tepelné vodivosti vlhkých materiálů. Displej

přístroje zároveň ukáže teplotu vzorku před a po měření (zvýšení teploty během měření bývá asi 20 °C) a průměrnou teplotu vzorku při měření. Shotherm QTM pracuje spolehlivě v teplotním oboru -10 až +200 °C [28].

- Metoda měření na přístroji **ISOMET** je založeno na analýze průběhu časové závislosti teplotní odezvy na impulsy tepelného toku do analyzovaného materiálu. Tepelný tok se vytváří rozptýleným elektrickým výkonem v odporu sondy, která je tepelně vodivě spojená s analyzovaným materiálem. Teplota odporu se snímá polovodičovým snímačem. Průběh teploty jako funkce času se v diskrétních bodech vzorkuje a těmito vzorky se prokládají regresní polynomy metodou "nejmenších čtverců". Koeficienty regresních polynomů slouží k výpočtu termofyzikálních parametrů [28].

Tento přístroj byl užit při zpracování tématu této diplomové práce, a proto je v další kapitole popsán podrobněji.

### 6.3.1 Měřicí přístroj ISOMET 2104

Isomet 2104 (viz obr. 15) je přenosný měřicí přístroj ke zjištění součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$ , měrné objemové tepelné kapacity  $c \cdot \rho$  a teplotní vodivosti  $a$  pomocí výměnných jehlových a plošných sond (použití sond závisí na typu testovaného materiálu). Aplikuje dynamickou metodu, která umožňuje zredukovat dobu měření na 10 – 17 minut. Přístroj je řízený procesorem, který umožňuje automatickou optimalizaci podmínek měřicího procesu a uložení naměřených dat [29].



*Obr. 15 Měřicí přístroj ISOMET 2104*

Měření je založeno na analýze **teplotní odezvy** zkoumaného materiálu **na impulsy tepelného toku**. Tepelný tok je vyvolán elektrickým vyhříváním odporového ohřívače v sondě, která je v přímém tepelném kontaktu s testovaným vzorkem. Vyčíslení hodnoty tepelné vodivosti  $\lambda$ , objemové tepelné kapacity  $c \cdot \rho$  a tepelné vodivosti  $a$  je založeno na vyhodnocení periodicky vzorkovaných záznamů teploty jako funkce času [29].

Měření pomocí přístroje Isomet probíhá následovně:

1. Přístroj automaticky uskuteční tzv. „proceduru přípravy měření“, což představuje čekání na dosažení „teplotního ustálení“. Příprava probíhá tak dlouho, až je dosaženo podmínek, které jsou nastaveny v přístroji výrobcem (kalibrace přístroje).
2. Přístroj automaticky uskuteční tzv. „optimalizaci“, což je hledání optimální úrovně výkonu, který bude vyzářený v sondě. Při optimalizaci je důležité mít stabilní teplotní podmínky, protože kolísání může ovlivnit nastavení optimální hodnoty.
3. Přístroj automaticky opakuje proceduru přípravy měření pro odstranění přechodových efektů, způsobených tepelnými impulzy v proceduře měření.
4. Měření je započato, jakmile je dosaženo ustálených podmínek nastavených v přístroji.

**Poznámka:** Detailnější informace o principu a softwaru nedává výrobce k dispozici považuje je za „*KNOW – HOW*“ firmy.

S přístrojem Isomet 2104 můžeme měřit různorodé materiály s velmi odlišnými mechanickými vlastnostmi. Je možné měřit materiály pevného skupenství v rozsahu od měkké pěny až po tvrdé kameny, tekutiny, suspenze, atd. Pro maximální přesnost měření specifických materiálů byli vyvinuty dva typy sond:

- A) Jehlová sonda (obr. 16) je určena na měření měkkých materiálů, kde se jehla jednoduše zapíchne do měřeného materiálu, nebo je možné pro jehlu vyvrtat přesnou díru. Je nutné, aby minimální hloubka materiálu obklopujícího jehlovou sondu byla 10 – 15 mm (v závislosti na tepelné vodivosti materiálu). Oblast snímače na sondě začíná 15 mm od špičky a je dlouhá 50 mm. Jehla sondy musí být zasunutá celá do měřeného materiálu až po rukojeť, aby se dosáhlo nejlepší přesnosti měření [29].



***Obr. 16*** Jehlová měřicí sonda přístroje ISOMET 2104

B) Plošná sonda (obr. 17) se používá na měření pevných a tvrdých materiálů. Měřicí plocha povrchu musí mít průměr minimálně 60 mm. Rovnost a hladkost měřicí plochy má přímý vliv na přesnost měření. Minimální hloubka měřeného materiálu musí být 10 – 15 mm v závislosti na tepelné vodivosti materiálu [29].



***Obr. 17*** Plošná měřicí sonda přístroje ISOMET 2104

Měřicí sondy jsou kalibrovány od výrobce na referenčních materiálech testovaných na stacionární aparatuře dle ISO 8302 [29].

## 6.4 Plán měření v rámci experimentu

Přesnost měření přístroje bude ověřena testováním materiálu, jehož tepelná vodivost  $\lambda$  je výrobcem uváděna, nebo je obecně známa (tabulky). Pro testování bude použita polyuretanová pěna.

Plán je sestaven tak, aby výsledky měření umožnily potvrdit (vyvrátit) hypotézy uvedené v cíli práce tj.:

1. Tepelná vodivost  $\lambda$  vlněné izolace se mění s její hustotou  $\rho$ , že tato závislost (hustota  $\rho$  – součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ ) má minimum a že toto minimum padne do intervalu hustot  $\rho$  výrobků dnes vyráběných firmou TUMAG.
2. Vlhkost vlněné izolace ovlivňuje její tepelnou vodivost  $\lambda$  v rozpětí menším, než je rozpětí „jedné třídy (skupiny)“ izolace (viz. kap. 5.1.1)

### 6.4.1 Zjištění závislosti součinitele tepelné vodivosti $\lambda$ na hustotě $\rho$ izolace

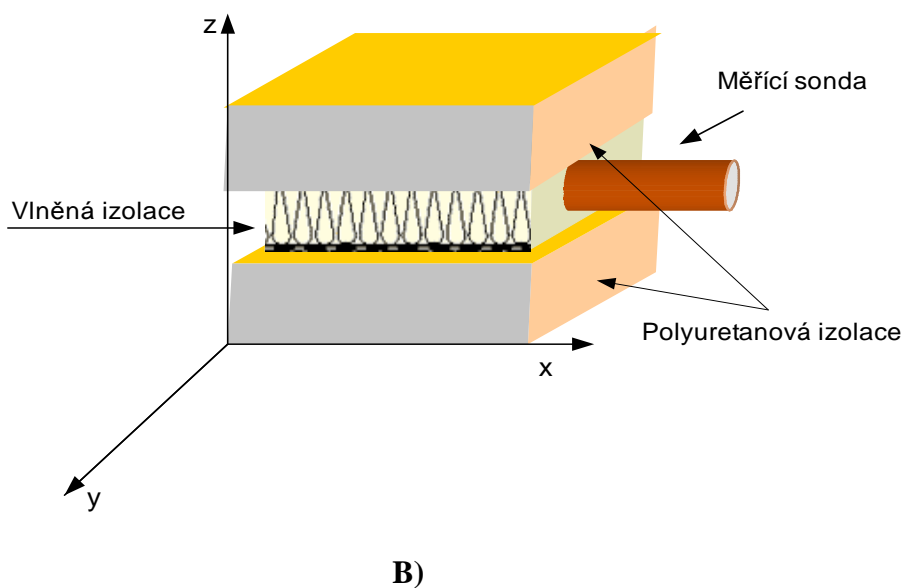
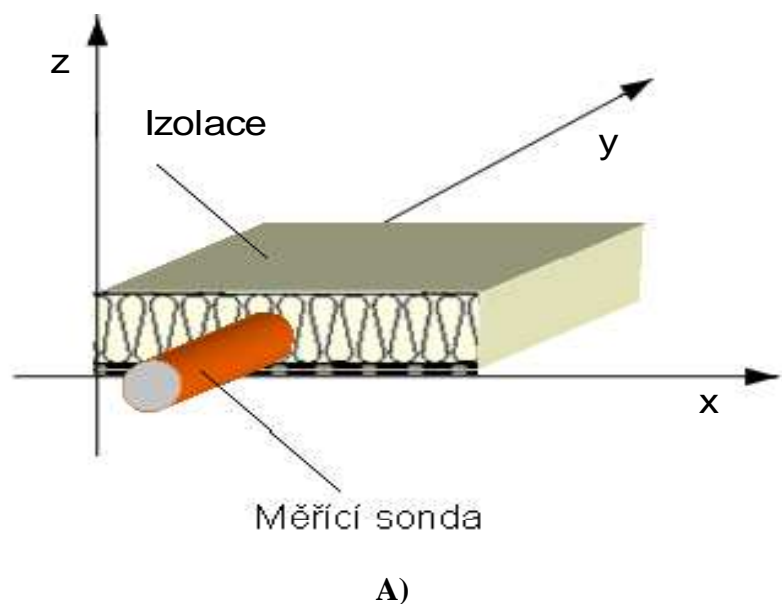
Cílem práce je v tomto experimentu najít závislost mezi hustotou izolace  $\rho$  a součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$ . Stavební izolace by měla mít co nejnižší součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . Snahou je toho dosáhnout při co nejnižších nákladech na materiál a výrobu. Za předpokladu, že má tato závislost minimum lze najít hustotu izolace  $\rho$ , která zajistí minimální tepelné úniky z budovy.

Jak již bylo zmíněno, v kap. 6.3 tepelná vodivost  $\lambda$  materiálu pro stavby se měří v ustáleném stavu metodou desky podle normy ČSN 72 70 12. Tato metoda je vysoce náročná na technické vybavení a čas. Vybavení TU k měření tepelné vodivosti  $\lambda$  je omezené.

Pro experiment byl vybrán přístroj ISOMET 2104 (viz. kap. 6.3.1). Měření tímto přístrojem není náročné, přístroj je přenosný, doba měření je relativně krátká (nejkratší z přístrojů které jsou k dispozici na TU).

Pro experiment se plánuje vyrobit vzorky vlněné izolace o plošných hmotnostech 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 a 1 kg/m<sup>2</sup> s konstantní tloušťkou 40 mm. Tyto hodnoty odpovídají možnostem výroby současných vlněných izolací. Z každého vzorku vlněné izolace o dané plošné hmotnosti se připraví pět vzorků pro měření (o rozměrech 250x250 mm), které se vyberou z různých míst vzorku izolace. Každý ze vzorku pro měření se zváží a

změří se jeho tloušťka. Měření tepelné vodivosti  $\lambda$  bude provedeno v osách  $x$  (kolmo ke skladům pavučiny obr. 18 B) a  $y$  (rovnoběžně se sklady pavučiny obr. 18 A) za normálních laboratorních podmínek, tj. hodnot  $\varphi$  a  $t$  v okamžiku zahájení měření.



**Obr. 18** Schéma uspořádání měření a umístění sondy do vzorku

Měřený vzorek vlněné izolace se vloží mezi „tlustou“ polyuretanovou izolaci (obr. 18 B), aby měření nebylo ovlivněno okolím (zajišťuje se tak bod 2 kap. 6.3.1). Polyuretanová izolace musí mít větší rozměry než vzorek vlněné izolace. Do vzorku



vlňné izolace se zasune sonda měřícího přístroje až po rukojeť a provede se měření (viz. popis měření 6.3.1). Výsledky měření budou statisticky zpracovány.

Vzorek izolace s nejnižší tepelnou vodivostí  $\lambda$  bude použit v dalším experimentu – ke stanovení vlivu vlhkosti na tepelnou vodivost  $\lambda$ .

#### **6.4.2 Vliv vlhkosti na tepelnou vodivost $\lambda$**

Cílem tohoto experimentu je zjistit vliv vlhkosti na tepelné vodivosti  $\lambda$  izolace. Jak bylo zmíněno v předešlé kapitole, k testování bude vybrána izolace s nejnižší tepelnou vodivostí  $\lambda$ . Vzorky se vysuší pro kontrolu množství (g/g) vlhkosti v sušicí komoře při teplotě 60 °C (kvůli nepoškození vláken vlny, vysouší se tak dlouho, až je hmotnost vzorků konstantní). Takto vysušené vzorky zvážíme a vložíme do klimatizační skříně. V klimatizační skříně se nastaví různá relativní vlhkost při konstantní teplotě 20 °C . Pro měření závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti se nastaví v klimatizační skříně relativní vlhkosti  $\varphi$  20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 %. Při nastavené vlhkosti se vzorky v klimatizační skříně ponechají 24 hodin. Po 24 hodinách se vzorek vyjme, zváží pro zjištění množství absorbované vlhkosti a provede se měření tepelné vodivosti  $\lambda$  . Postup měření tepelné vodivosti  $\lambda$  je shodný s postupem v kap. 6.4.1.

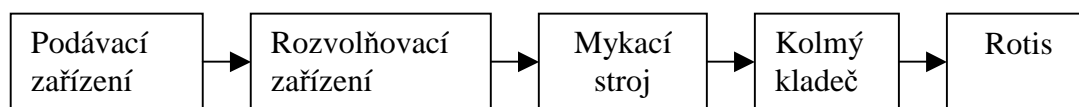
## 7. Experiment

### 7.1 Výroba vzorků izolace

Izolace pro naplánované měření byla vyrobena z ovčí vlny slovenské provenience. Délka vláken této vlny se pohybovala od 6 – 15 cm, střední průměr vláken 34  $\mu\text{m}$  (46' Bradfordské stupnice), obsah tuku do 1 % (údaje dodané prodejcem).

Výroba probíhala v provozu firmy TUMAG (schéma výrobní linky je na obr. 19) následovně:

Ovčí vlna se z balíku vloží do podávacího zařízení, ze kterého je transportována přetlakovou pneumatickou dopravou k rozvolňovacímu zařízení. Z něho je „rozvolněná“ opět přetlakovou pneumatickou dopravou transportována do zásobovací šachty mykacího stroje, odkud je podávána do mykacího stroje podávacím ustrojím s pilkovým potahem. Rychlost podávání byla pro všechny navržené izolace konstantní.



*Obr. 19 Schéma výrobní linky*

Pavučina je z mykacího stroje vedena na pásový dopravník, který přivádí pavučinu ke kolmému rotačnímu kladeči, kde se pomocí podávacích disků a pracovních kotoučů vláknenná pavučina formuje do rouna a klade na PP mřížku, která leží na dopravníku.

Rychlosti podávacích disků a pracovních kotoučů kolmého kladeče jsou v experimentu konstantní. Plánovanými změnami rychlostí dopravníku (viz tab. 8) byly vyrobeny vzorky izolace v rozsahu skutečných plošných hmotností opět uvedených v tab. 8.

Rouno uložené na PP mřížce je dopraveno k zařízení „ROTIS“, které **mechanicky** spojí rouno s PP mřížkou pomocí tzv. kvazi přízí.

**Tab. 8 Technologické parametry vzorků vyrobených pro experiment:**

Označení izolace	A	B	C	D	E	F
Plánovaná plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	500	600	700	800	900	1000
Plánovaná tloušťka [mm]	40	40	40	40	40	40
Plánovaná výrobní rychlost [m/min]	1,4	1,2	1,00	0,8	0,6	0,4
Skutečné hodnoty izolací	A	B	C	D	E	F
Výrobní rychlost [m/min]	1,42	1,24	1,00	0,77	0,57	0,40
Tloušťka [mm] ± s	37 ± 3	41 ± 2	45 ± 2	44 ± 2	47 ± 2	50 ± 1
Skutečná plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ] ± s	481 ± 30	554 ± 50	722 ± 50	888 ± 60	1078 ± 60	1488 ± 70
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ] ± s	13,1 ± 0,5	14 ± 1	16,1 ± 0,9	20,2 ± 0,7	23 ± 1	30 ± 1

**Pozn.** s.....směrodatná odchylka

## 7.2 Příprava vzorků pro měření tepelné vodivosti $\lambda$

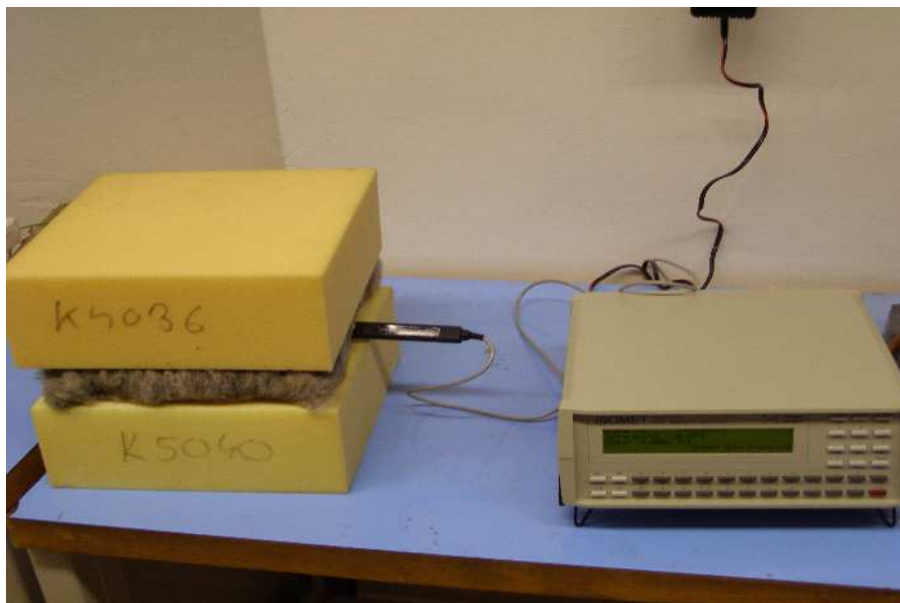
Z každé vzorku izolace bylo náhodně vystřiženo pět vzorků o rozměrech 250 x 250 mm. Vzorky byly vystřiženy z různých míst izolace, min. 100 mm od kraje izolace (podle ČSN 72 73 06). Bohužel se nepodařilo vyrobit vzorky o konstantní tloušťce, proto bylo nutné měřit tloušťku izolace pro výpočet její hustoty  $\rho$  (objemové hmotnosti).

Pro měření tloušťky izolace byla použita metoda měření podle normy EDANA 30.4 – 89 (měření tloušťky objemových netkaných textilií). Měření bylo provedeno pod předepsaným tlakem na vzorek 0,02 kPa.

U každého vzorku se měřila tloušťka na čtyřech různých místech. Naměřená data jsou v příloze 1. V tabulce 8 jsou uvedeny výsledky po statistickém zpracování naměřených dat, tj. průměrné hodnoty a směrodatné odchylky.

### 7.3 Měření součinitele tepelné vodivosti $\lambda$

Měření probíhalo dle postupu popsáném v kap. 6.4.1 a 6.4.2. V experimentu byly použity polyuretanové izolace s označením K 50 40 (spodní) a K 40 36 (horní). Jejich parametry jsou v příloze 3. Na obr. 20 je uspořádání měřicího přístroje a měřeného vzorku izolace.



Obr. 20 Uspořádání měřicího přístroje a měřeného vzorku izolace

#### 7.3.1 Závislost $\lambda$ na hustotě $\rho$ izolace

Měření probíhalo v laboratoři za těchto podmínek: teplota v laboratoři  $t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost vzduchu  $\varphi = 40\%$ .

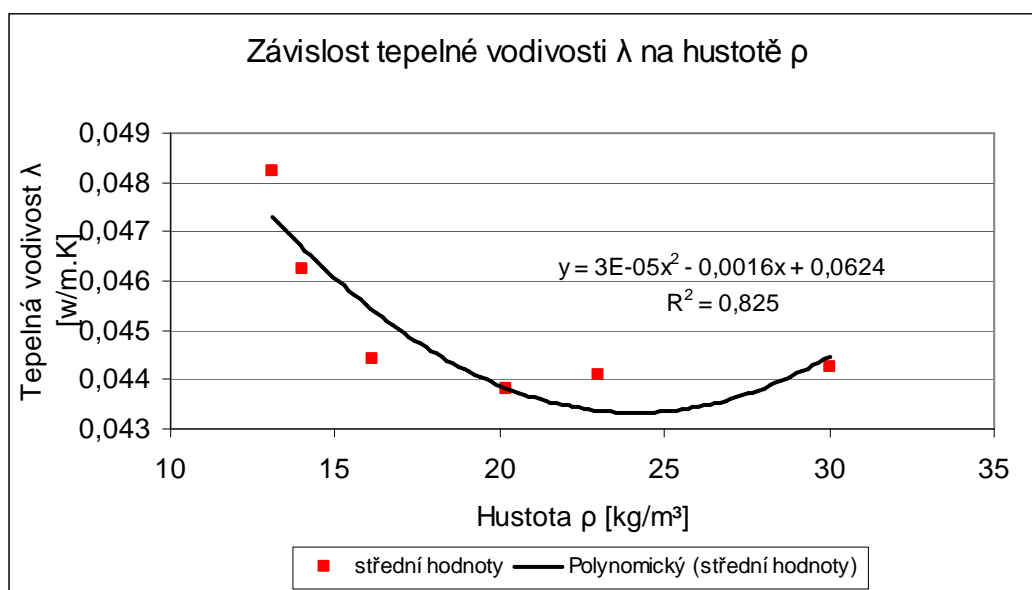
Naměřené hodnoty jsou v příloze 4, výsledky po statistickém zpracování jsou v tabulce 9 (střední hodnoty a směrodatné odchylky).

Tab. 9 Výsledky po statistickém zpracování

Izolace	A	B	C
$\lambda$ [w/m.K]	$0,048 \pm 0,001$	$0,0463 \pm 0,0007$	$0,0444 \pm 0,0005$
c.p E+6 [J/m <sup>3</sup> .K]	$0,090 \pm 0,003$	$0,081 \pm 0,002$	$0,080 \pm 0,003$
$a$ E-6 [m <sup>2</sup> /s]	$0,54 \pm 0,02$	$0,572 \pm 0,009$	$0,56 \pm 0,03$

Izolace	D	E	F
$\lambda$ [w/m.K]	$0,0438 \pm 0,0005$	$0,0441 \pm 0,0009$	$0,0442 \pm 0,0010$
c.p E+6 [J/m <sup>3</sup> .K]	$0,083 \pm 0,004$	$0,085 \pm 0,004$	$0,093 \pm 0,003$
$a$ E-6 [m <sup>2</sup> /s]	$0,53 \pm 0,03$	$0,52 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,02$

Z tabulky 9 vyplývá, že u izolace *D* byla naměřena nejnižší tepelná vodivost  $\lambda$ , a tak bude použita pro další experiment.



**Obr. 21** Závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na hustotě  $\rho$

Z obr. 21 je zřejmé, že minimum tepelné vodivosti  $\lambda$  přísluší intervalu hustot  $\rho$  20 – 24 kg/m³ (podle použité křivky).

### 7.3.2 Závislost $\lambda$ na vlhkosti $\varphi_i$

Měření proběhlo dle návrhu popsaného v kap. 6.4.2. Pro měření byly vybrány dva vzorky ze skupiny *D* (u této izolace byl naměřen nejnižší součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  za podmínek podle kap. 7.3.1). Oba vzorky izolace byly vysoušeny při teplotě 60 °C tak dlouho, až se jejich hmotnost neměnila (následující hodnota viz příloha 5), a zváženy. Poté byly vloženy do klimatizační skříně, kde byly při teplotě 20 °C nastavovány plánované hodnoty relativní vlhkosti  $\varphi$  20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 %. Vzorky byly po odebrání z klimatizační skříně zváženy a následovalo měření tepelné vodivosti  $\lambda$  postupem totožným s kap. 7.3.1.

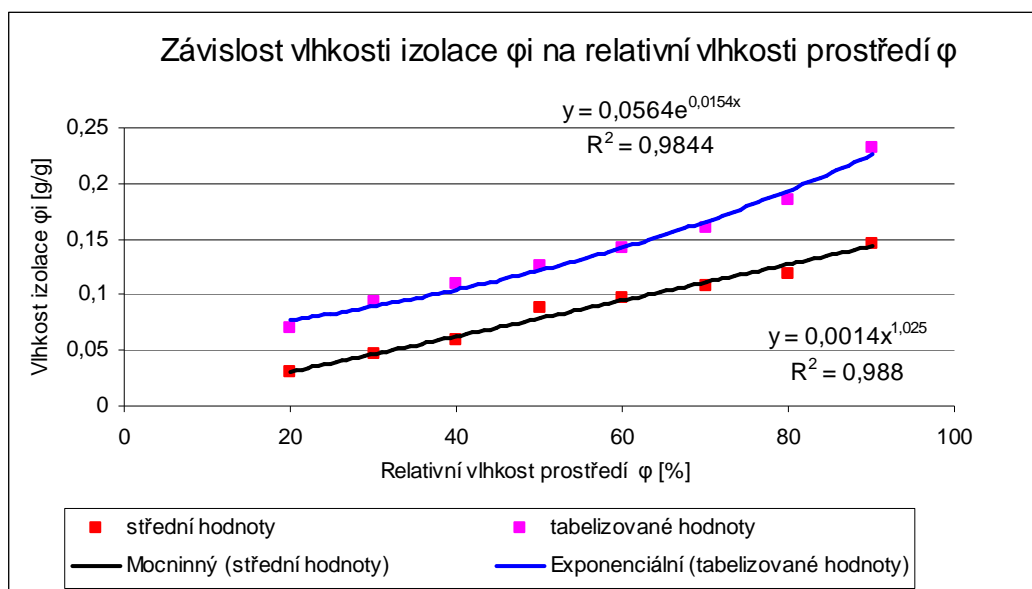
V příloze 6, 7 a 8 jsou naměřená data hmotnosti a tepelné vodivosti  $\lambda$  vzorků. Výsledky po statistickém zpracování jsou v tabulce 10 (střední hodnoty a směrodatné odchylky).

Tab. 10 Výsledky po statistickém zpracování

Relativní vlhkost prostředí $\phi$ [%]	20	30	40	50
Obsah vlhkosti ve vzorku [g/g]	$0,03 \pm 0,006$	$0,047 \pm 0,006$	$0,060 \pm 0,003$	$0,089 \pm 0,004$
$\lambda$ [w/m.K]	$0,0424 \pm 0,0006$	$0,0431 \pm 0,0002$	$0,0437 \pm 0,0005$	$0,0445 \pm 0,0005$
c.p E+6 [J/m <sup>3</sup> .K]	$0,076 \pm 0,006$	$0,089 \pm 0,003$	$0,083 \pm 0,005$	$0,089 \pm 0,005$
$\alpha$ E-6 [m <sup>2</sup> /s]	$0,56 \pm 0,04$	$0,49 \pm 0,01$	$0,53 \pm 0,04$	$0,50 \pm 0,03$
Hustota vzorku $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	19,15	19,27	19,82	20,13

Relativní vlhkost prostředí $\phi$ [%]	60	70	80	90
Obsah vlhkosti ve vzorku [g/g]	$0,097 \pm 0,005$	$0,108 \pm 0,005$	$0,119 \pm 0,009$	$0,146 \pm 0,004$
$\lambda$ [w/m.K]	$0,0445 \pm 0,0005$	$0,0453 \pm 0,0007$	$0,0460 \pm 0,0002$	$0,0461 \pm 0,0005$
c.p E+6 [J/m <sup>3</sup> .K]	$0,089 \pm 0,005$	$0,090 \pm 0,003$	$0,097 \pm 0,004$	$0,102 \pm 0,006$
$\alpha$ E-6 [m <sup>2</sup> /s]	$0,50 \pm 0,03$	$0,51 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,03$
Hustota vzorku $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	20,38	20,58	20,78	21,3

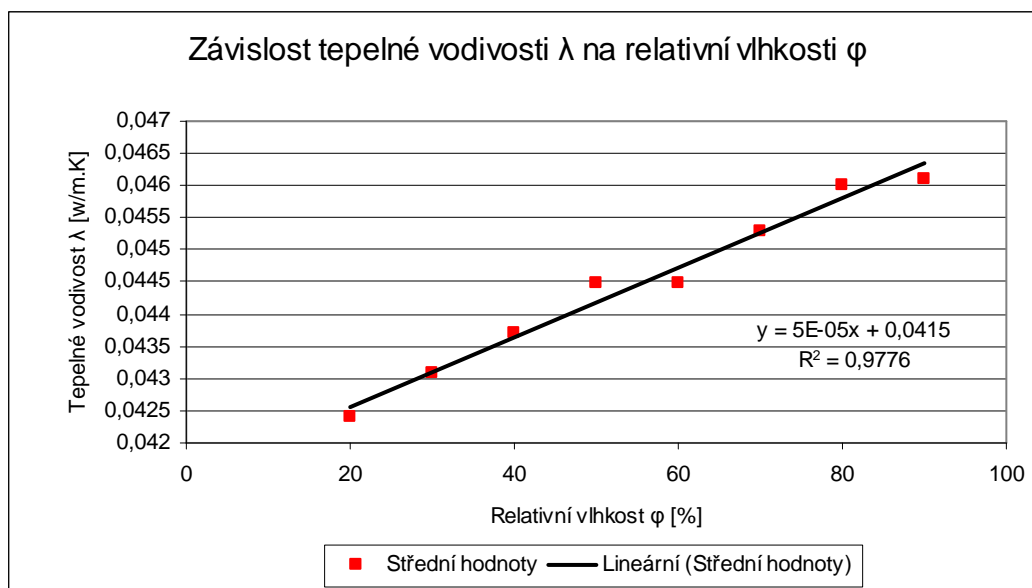
Z tabulky 10 a obr. 22 je patrné, jak relativní vlhkost okolí  $\phi$  ovlivní vlhkost vzorku  $\phi_i$ .



Obr. 22 Závislost vlhkosti izolace  $\phi_i$  na relativní vlhkosti prostředí  $\phi$

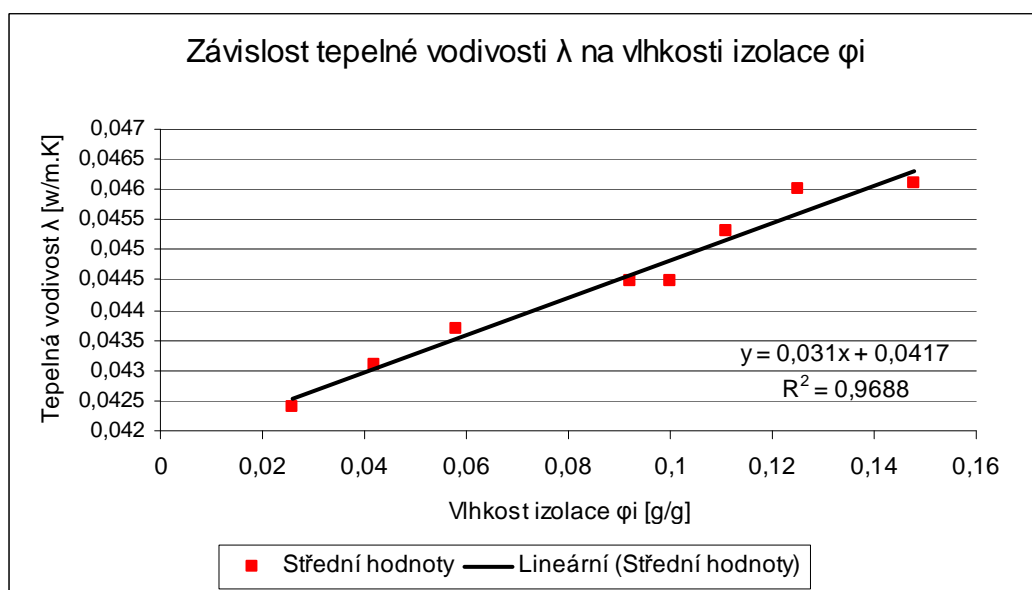
Z tab. 3, 10 a obr. 22 je zřejmý rozdíl v průběhu křivek, který lze zdůvodnit rozdílným typem vlny. Testované vzorky by měly obsahovat více vody než bylo naměřeno.

Z tabulky 10 a obr. 23 je patrné, jak relativní vlhkost okolí  $\varphi$  ovlivní tepelnou vodivost  $\lambda$  izolace. Změny tepelné vodivosti  $\lambda$  vlněné izolace jsou obsaženy v intervalu  $\langle 0,0418; 0,0466 \rangle$ .



**Obr. 23** Závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na relativní vlhkosti prostředí  $\varphi$

Z obr. 23 je zřejmé, že tepelná vodivost  $\lambda$  se zvyšuje s relativní vlhkostí  $\varphi$  a to lineárně. Z tabulky 10 a obr. 24 je patrné, že závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti izolace  $\varphi_i$  je lineární jako na obr.23.



**Obr. 24** Závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti izolace  $\varphi_i$

## 7.4 Diskuze k výsledkům

Naměřené hodnoty vedou k následujícím závěrům:

1. Použitý přístroj vyhovuje svou přesností pouze pro orientační měření. To proto, že doba měření je příliš dlouhá na „udržení vlhkosti ve vláknech při jeho zahřívání“ (viz kap. 2.1.7 obr. 8). Pro porovnávací měření je však použitelný, hodnoty tepelné vodivosti  $\lambda$  naměřené na srovnávacích vzorcích (polyuretanové pěny) odpovídají údajům uváděným v stavebních tabulkách. Stavební tabulky uvádějí tepelnou vodivost  $\lambda = 0,043 \text{ W/m.K}$  pro polyuretanovou pěnu o hustotě  $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ . Naměřená byla tepelná vodivost  $\lambda = 0,0431 \text{ W/m.K}$  při hustotě  $\rho = 49 \text{ kg/m}^3$ .
2. Závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na hustotě  $\rho$  izolace vykazuje minimum, hodnota minima závisí na způsobu vyhodnocení (použitá křivka). Polynom 2. stupně ukazuje na  $\rho = 24 \text{ kg/m}^3$ , naměřeno bylo při hustotě  $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$ .
3. Závislost tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti vzorku  $\varphi_i$  ukazuje na lineární závislost, přesnost tohoto měření je však ovlivněna dobou měření. Doba měření je příliš dlouhá na tepelné děje ve vlněné izolaci (viz obr. 8) způsobené měřicí sondou přístroje. Vhodnější zařízení však doposud není na TUL k dispozici.

### 7.4.1 Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ , tepelné objemové kapacity $c_p$ a teplotní vodivosti $a$ na hustotě $\rho$

#### *Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ na hustotě $\rho$*

V odborné literatuře je zmiňován fakt, že s rostoucí hustotou  $\rho$  vlákněného útvaru jeho tepelná vodivost  $\lambda$  rychle klesá až do určitého minima a pak znovu roste (viz kap. 4.2 obr. 8). Toto byl základní předpoklad pro vyslovení hypotézy v úvodu práce (viz kap. 1).

Experiment byl navržen tak, aby bylo zjištěno, zda má firma TUMAG ve svém sortimentu vlněnou izolaci o hustotě  $\rho$  s minimální tepelnou vodivostí  $\lambda$ , resp. s maximálním tepelným odporem  $R$ .

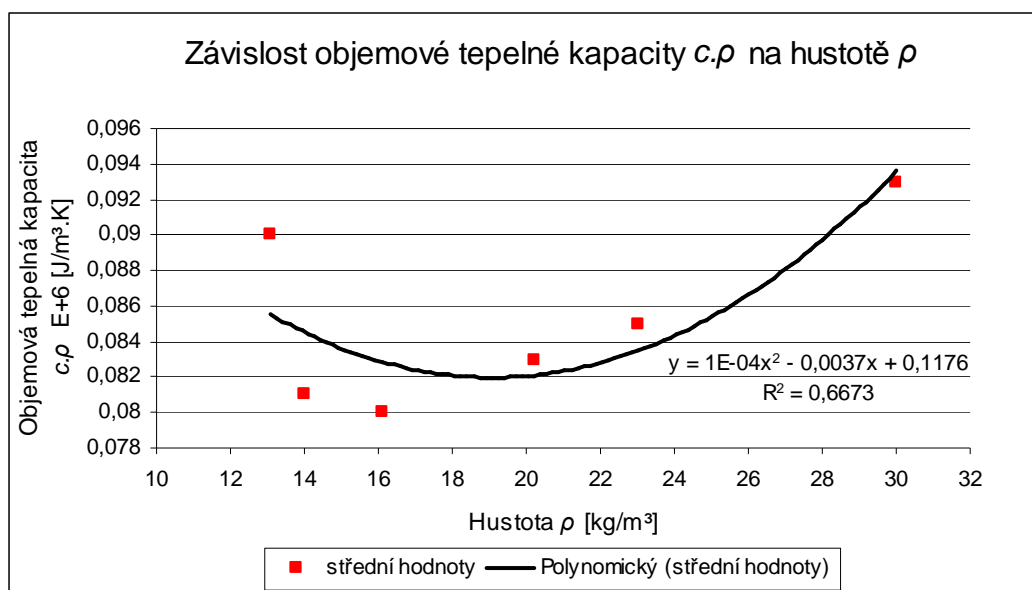
Pro tento účel bylo vyrobeno šest vzorků vlněné izolace o různých (prakticky dosažitelných) hustotách  $\rho$  (viz kap. 7.1 tab. 8). Z výsledků (viz tab. 9) je zřejmé, že s hustotou  $\rho$  vlněné izolace se tepelná vodivost  $\lambda$  mění. Závislost je znázorněna na obr. 21. Z něho je zřejmé, že hypotéza o existenci minima tepelné vodivosti  $\lambda$  se potvrdila.



Vlněnou izolaci s minimální tepelnou vodivostí  $\lambda$  tj. s hustotou  $\rho = 20 - 24 \text{ kg/m}^3$  však firma TUMAG nenabízí, toho času ve vyráběném sortimentu není.

### ***Závislost objemové tepelné kapacity $c \cdot \rho$ na hustotě $\rho$***

Závislost objemové tepelné kapacity  $c \cdot \rho$  na hustotě  $\rho$  je svým průběhem podobná závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  na hustotě  $\rho$ .

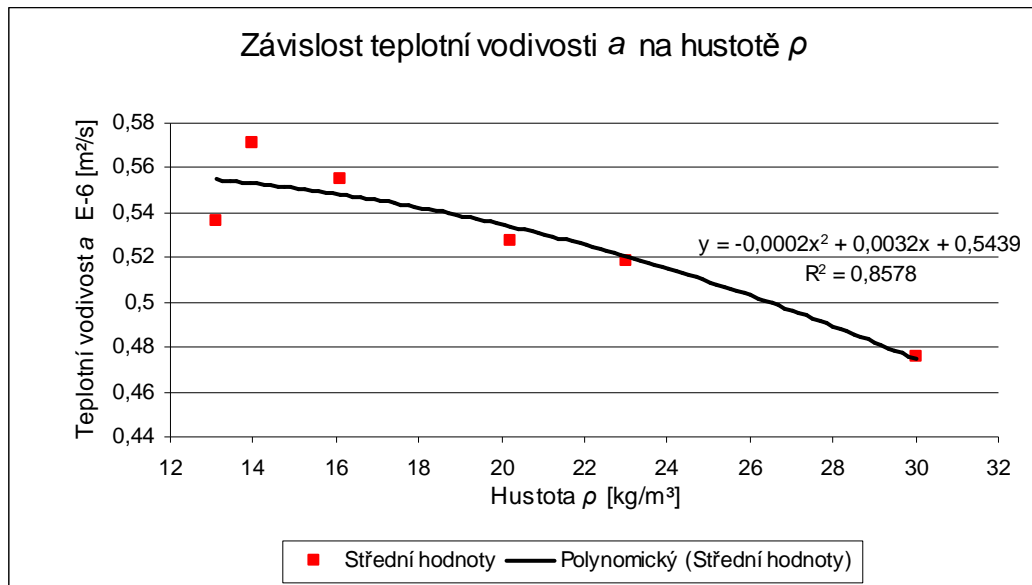


***Obr. 25 Závislost objemové tepelné kapacity  $c \cdot \rho$  na hustotě  $\rho$***

Z obr. 25 je zřejmé, že s rostoucí hustotou  $\rho$  izolace nejprve objemová tepelná kapacita  $c \cdot \rho$  klesá do svého minima a pak znovu roste. Její minimum lze nalézt v intervalu hustot  $\rho$  16 - 19 kg/m³.

### ***Závislost teplotní vodivosti $a$ na hustotě $\rho$***

Teplotní vodivost  $a$  je přímo úměrná tepelné vodivosti  $\lambda$  a nepřímo objemové tepelné kapacitě  $c \cdot \rho$  viz kap. 3.1, vztah (12). Naměřené hodnoty  $a$  jimi proložená regresní křivka je na obr. 26.

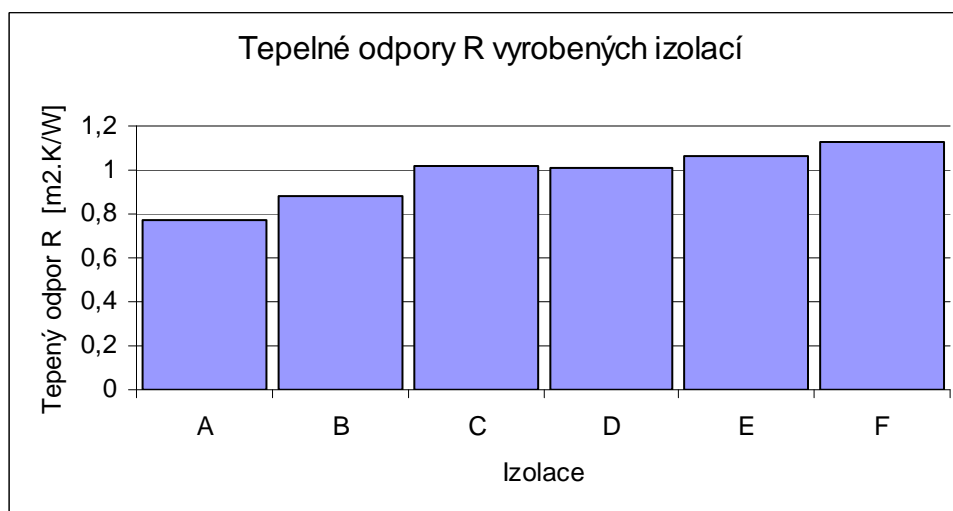


***Obr. 26 Závislost teplotní vodivosti  $a$  na hustotě  $\rho$***

Ze vztahu (12) vyplývá, že teplotní vodivost  $a$  s rostoucí hustotou  $\rho$  může klesat pouze za předpokladu, že tepelná vodivost  $\lambda$  poroste pomaleji než objemová tepelná kapacita  $c \cdot \rho$ .

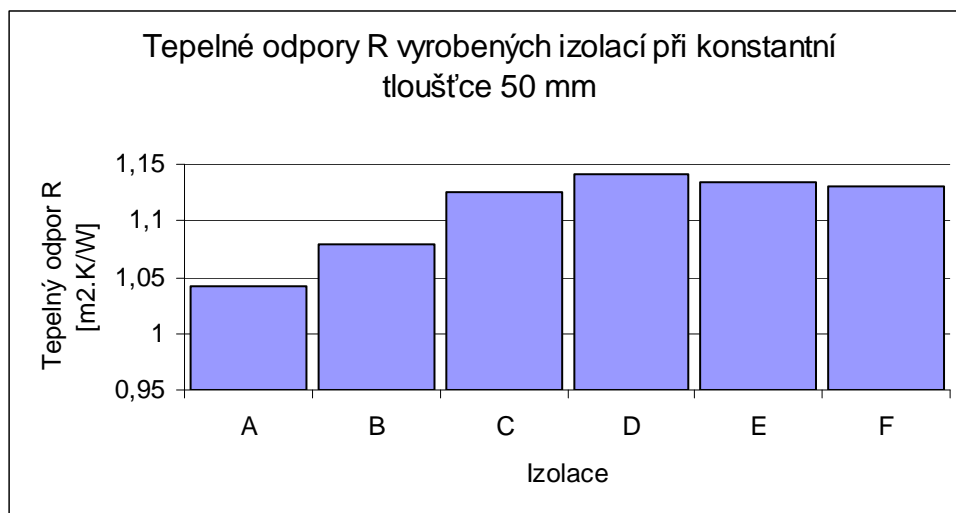
### ***Tepelné odpory $R$ vyrobených izolací***

Z naměřených hodnot (viz. tab. 8 a 9) byly vypočteny tepelné odpory  $R$  podle kap. 3.1 vztahu (16), které jsou na obr. 27 a 28.



***Obr. 27 Tepelné odpory  $R$  vyrobených izolací***

Z obr. 27 a tab. 8 a 9 plyne, že čím je izolace tlustší (viz tab. 8), tím má větší tepelný odpor  $R$ . Jestliže však bude tloušťka izolace konstantní, jak je tomu na obr. 28, pak největší tepelný odpor bude vykazovat izolace s nejnižší tepelnou vodivostí  $\lambda$  (viz tab.9) – izolace  $D$  s hustotou  $\rho$  20 kg/m<sup>3</sup>.



**Obr. 28** Tepelné odpory  $R$  vyrobených izolací při konstantní tloušťce 50 mm

Jako „měrná“ tloušťka byla pro výpočet vybrána tloušťka 50 mm.

#### 7.4.5 Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ , tepelné objemové kapacity $c_p$ a teplotní vodivosti $a$ na vlhkosti vzorků $\varphi_i$ a relativní vlhkosti $\varphi$

##### *Závislost tepelné vodivosti $\lambda$ na relativní vlhkosti $\varphi$ a vlhkosti izolace $\varphi_i$*

Na základě výsledků z experimentu 7.3.1 byl pro zjištění závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti okolí  $\varphi$  a vlhkosti vzorku  $\varphi_i$  zvolen vzorek vlněné izolace  $D$  (viz tab. 9). Vzorek vlněné izolace  $D$  vykazuje hodnotu tepelné vodivosti  $\lambda = 0,0438 \pm 0,0005$  W/m.K, spadá do skupiny izolací 045 (viz. kap. 5.1.1).

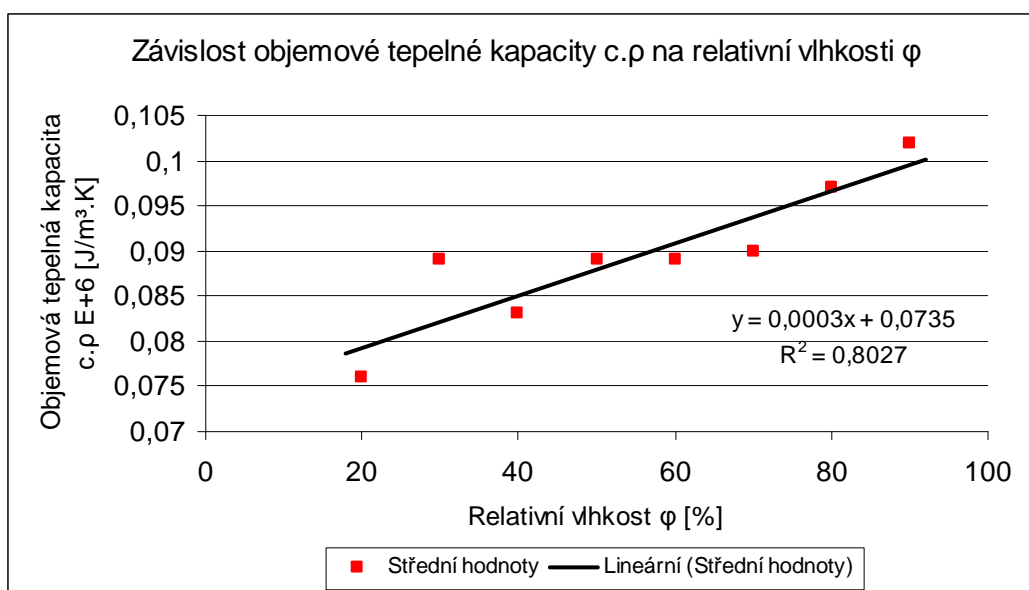
Měření ukazují, že změny tepelné vodivosti  $\lambda$  v závislosti na vlhkosti  $\varphi_i$  vlněné izolace (viz tab. 10) se pohybují v intervalu  $<0,0418 - 0,0466>$  W/m.K. Proto se hypotéza uvedená v úvodu, tj. že změna tepelné vodivosti  $\lambda$  izolace vyvolaná změnou její vlhkosti nepřekročí interval, který změní její zařazení do „aplikační skupiny“, se nepotvrdila.

Třída je totiž definována intervalem tepelné vodivosti  $\lambda$  v délce 0,005 W/m.K (viz kap. 5.1.1), délka intervalu tepelné vodivosti  $\lambda$  vzorku  $D$  v celém rozsahu vlhkostí je 0,048 W/m.K (viz tab. 10), protože však střední hodnota tepelné vodivosti  $\lambda$  vzorku  $D$  je

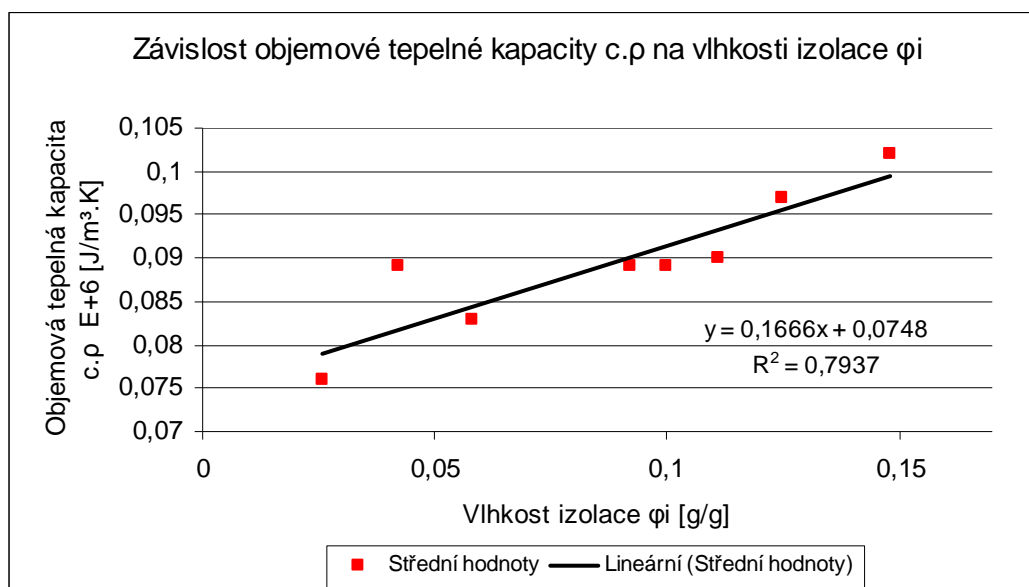
0,0438 W/m.K, nárůst tepelné vodivosti  $\lambda$  o 0,0048 W/m.K přesune (přeřadí) třídu izolace do vyšší skupiny (ze třídy 045 do třídy 050).

### ***Závislost objemové tepelné kapacity $c_p$ na relativní vlhkosti $\varphi$ a vlhkosti izolace $\varphi_i$***

Objemová tepelná kapacita  $c_p$  roste se zvyšující se vlhkostí  $\varphi$  i zvyšující se vlhkostí izolace  $\varphi_i$ , jako tomu je u tepelné vodivosti  $\lambda$ . Vyrůstá lineárně, jak je vidět na obr. 29 a 30



***Obr. 29 Závislost objemové tepelné kapacity  $c_p$  na relativní vlhkosti  $\varphi$***

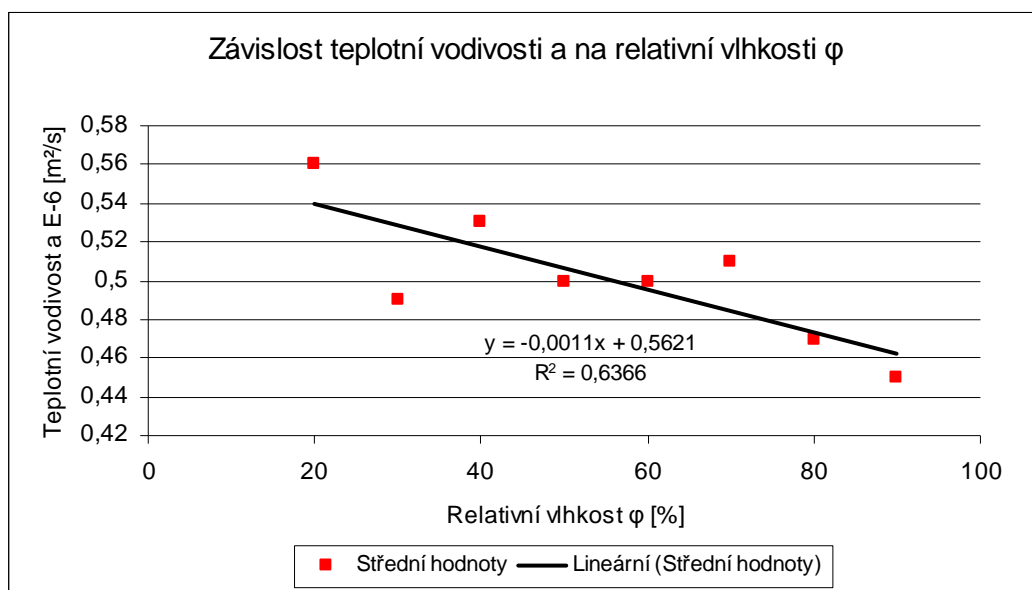


***Obr. 30 Závislost objemové tepelné kapacity  $c_p$  na vlhkosti izolace  $\varphi_i$***

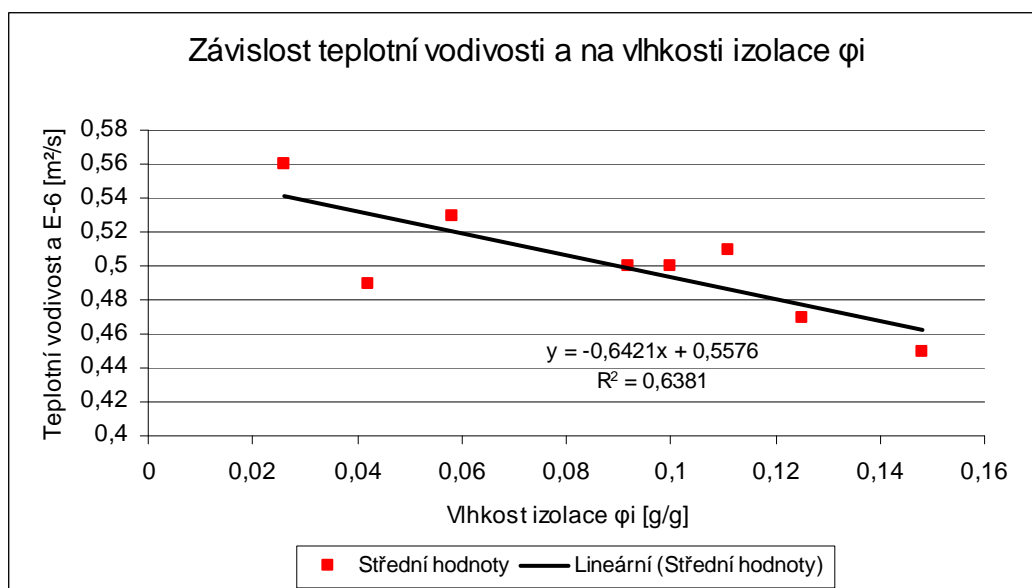
Průběhy pravděpodobně souvisí s přibýváním hustoty vlivem přibývajících vlhkosti. Hustota  $\rho$  vzorku se měnila v intervalu  $<19,15 - 21,3> \text{ kg/m}^3$  viz tab. 10.

### ***Závislost teplotní vodivosti $a$ na relativní vlhkosti $\varphi$ a vlhkosti izolace $\varphi_i$***

Z průběhu křivky na obr. 31, 32 a definice teplotní vodivosti  $a$  (viz kap 3.1) je zřejmé, že má-li teplotní vodivost  $a$  v závislosti na vlhkosti  $\varphi$  a  $\varphi_i$  klesat musí tepelná vodivost  $\lambda$  růst pomaleji než objemová tepelná kapacita  $c \cdot \rho$ .



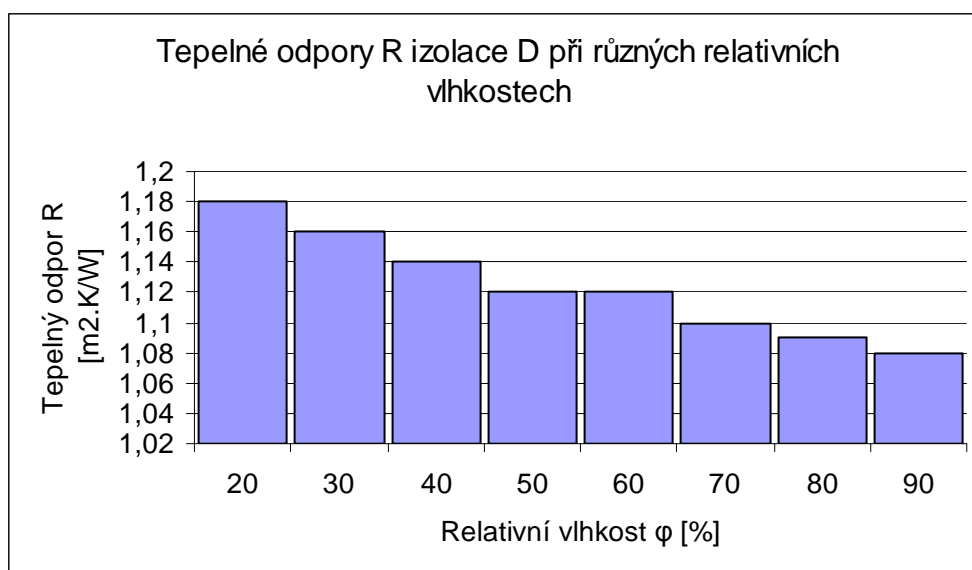
***Obr. 31 Závislost teplotní vodivosti  $a$  na relativní vlhkosti  $\varphi$***



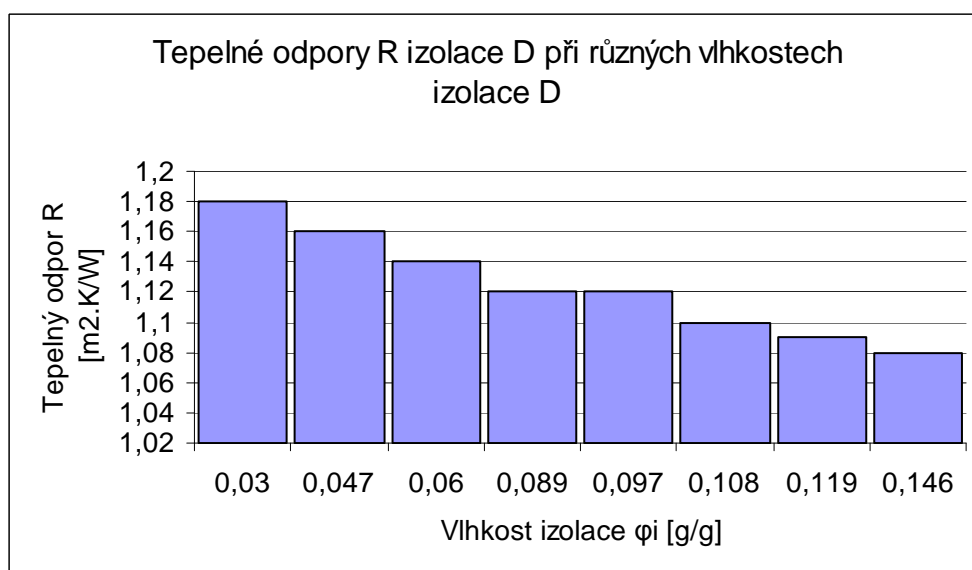
***Obr. 32 Závislost teplotní vodivosti  $a$  na vlhkosti izolace  $\varphi_i$***

Pro praktické posuzování kvality izolací a jejich aplikaci je rozhodující naměřená tepelná vodivost  $\lambda$  resp. tepelný odpor  $R$ .

Jeho změny v závislosti na vlhkostech  $\varphi$  a  $\varphi_i$  jsou na obr. 33 a 34.



**Obr. 33** Tepelné odpory  $R$  izolace D při různých relativních vlhkostech  $\varphi$



**Obr.34** Tepelné odpory  $R$  izolace D při různých vlhkostech izolace  $\varphi_i$

Z obr. 33 a 34 je patrné, že tepelný odpor  $R$  se snižuje s rostoucí vlhkostí o cca. 0,1 m².K/W což je 9%.

## 8. Závěr

Předmětem řešení této diplomové práce je „stavební izolace z vlněného vlákna“. Jedná se o velmi aktuální téma, protože ceny energií rostou stejně jako požadavky na ekologickou nezávadnost stavebních materiálů.

V šesti kapitolách práce jsou shrnuty poznatky o používaných izolačních materiálech ve stavebnictví, o šíření tepla vlákennými materiály, prostor byl věnován ovčí vlně samotné, stavební izolaci z vlněného vlákna a vlivu parametrů textilie na tepelnou vodivost. Jsou zde popsány požadavky na produkty používané k izolaci staveb. Tato část práce je zpracována formou literární rešerše.

**Výsledkem vlastní experimentální práce** popsané v kap. 7 je zjištění, že minimum tepelné vodivosti  $\lambda$  náleží hustotě  $\rho$  vlněné izolace, kterou dnes firma nevyrábí, ale které na výrobní lince firmy TUMAG se správným seřízením dosáhne. Byla naměřena konkrétní hodnota minima tepelné vodivosti  $\lambda = 0,0438 \text{ W/m.K}$ , která přísluší hustotě izolace  $\rho = 20,2 \text{ kg/m}^3$ . Regresní křivka proložená naměřenými daty posouvá minimum tepelné vodivosti  $\lambda$  k vyšším hustotám  $\rho$ , bylo by proto vhodné provést dodatečné měření v intervalu hustot  $\rho < 20 - 24 > \text{ kg/m}^3$  (viz kap. 7.3.1). Tyto hodnoty jsou doporučením výrobcí izolace. Je však nutné posoudit ekonomický dopad aplikace výsledku do výroby zpracováním podrobné ekonomické rozvahy. Je zřejmé, že s růstem hustoty  $\rho$  izolace poroste i její cena.

Dalším důležitým faktorem je zjištění závislosti tepelné vodivosti  $\lambda$  na vlhkosti  $\varphi_i$  izolace i na vlhkosti  $\varphi$  okolí. Bylo zjištěno, že zvýšení tepelné vodivosti  $\lambda$  vlněné izolace při sorpci vlhkosti z okolí vede k **mírnému** – **10%** zhoršení izolačních vlastností. S tím souvisí i „přechod“ výrobku do „horší izolační skupiny“ (viz kap. 5.1.1 a kap. 7.3.2).

Je však třeba podotknout, že přesnost měření tepelné vodivosti  $\lambda$  při různých vlhkostech  $\varphi_i$  izolace je ovlivněna dobou měření a tedy zvolenou technikou. Pro praktické účely lze výsledky využít pro doporučení vlny jako izolačního materiálu, zvláště za předpokladu, že produkt bude vyráběn s hustotou  $\rho$  okolo  $24 \text{ kg/m}^3$ .

## Seznam použité literatury

- [1] MILITKÝ, J.: Textilní vlákna, TU v Liberci 2002
- [2] HLADÍK, V.: Textilní vlákna, SNLT 1970
- [3] WAGNER, J.: Fyzika, Liberec 1989
- [4] KALOUSEK, M. – HUČKO, B.: Přenos tepla, STU v Bratislave, 1996
- [5] FARNTWORTH, B.: Mechanism of Heat Flow Through Clothing Insulation, Textile Research Journal, December 1983
- [6] STARK, C. – FRICKE, J.: Improved heat transfer models for fibrous insulation In: *Int. J. Heat Mass transfer.* 36, 617-625, 1993
- [7] HORÁK, Z. – KRUPKA, F.: Fyzika, SNTL Praha 1976
- [8] JIRSÁK, O.: Netkané textilie, skripta TU v Liberci 2003
- [9] RENDLA, F.: Tepelné izolace, SNTL Praha 1962
- [10] MICHEJEV, M. A.: Základy sdílení tepla, SNTL Praha 1953
- [11] <http://www.rockwool.cz/sw50584.asp#tloustka>
- [12] <http://www.i-ekis.cz/?akce=archiv&idp=688>
- [13] <http://www.seconnatureuk.com/spec.htm>
- [14] <http://www.sheepwoolinsulation.ie/abtprods.htm>
- [15] <http://web.quick.cz/inwool/>
- [16] CAPS, R. – UMBACH, K.-H.: Optimierung der Wärmeisolation von Polyester-Vliesstoffen, In: *Melliand Textilberichte* 71, 440-445, 1990
- [17] <http://www.rotaflex.cz/>
- [18] ROCHLA, M.: Stavební tabulky, SNTL Praha 1987
- [19] [http://www.izopol.cz/penovy\\_polystyren.htm](http://www.izopol.cz/penovy_polystyren.htm)
- [20] DUCHÁČEK, V.: Polymery – Výroba, vlastnosti, zpracování, použití, VŠCHT v Praze 1995
- [21] [http://archiv.neviditelnypes.zpravy.cz/bydleni/clanky/6254\\_5\\_0\\_0.html](http://archiv.neviditelnypes.zpravy.cz/bydleni/clanky/6254_5_0_0.html)
- [22] Reklamní prospect firmy TUMAG
- [23] NECKÁŘ, B.: Morfologie a strukturní mechanika obecných vláknenných útvarů, TU v Liberci 2001
- [24] SAZIMA, M. - KMONÍČEK, V. – SCHNELLER, J. – A KOL.: Teplo, SNTL Praha 1989
- [25] JIRSÁK, O. – MOUČKOVÁ, A.: Radiační tok tepla textiliemi, Strutex 8. národní konference TU Liberec 2001
- [26] ŠÁLA, J.: Zateplování budov, Grada Publishing s.r.o., Praha 2000
- [27] ŠUBRT, R.: Tepelné izolace domů a bytů (2. vydání), Grada Publishing s.r.o., Praha 1999
- [28] <http://ceg.fsv.cvut.cz/CZ/ceg-vyzkum/tepelne.htm>
- [29] Manuál k přístroji ISOMET 2104
- [30] <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=2526>
- [31] SVENNERBERG, K.: Determination of moisture properties and verification of step responses for materials and material combinations, Report TVBH-7229 Lund 2005
- [32] <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/TextilniZkusebnictvi.pdf>
- [33] PEHLE, T.: Správné izolace, Rebo productions cz, spol. s r. o., Česlice 2002
- [34] <http://www.izwool.com/qualities-of-wool-3.htm>



## Přílohy:

*Příloha 1: Naměřené tloušťky vzorků*

Vzorek a měření	tloušťka A [mm]	tloušťka B [mm]	tloušťka C [mm]	tloušťka D [mm]	tloušťka E [mm]	tloušťka F [mm]
11	38	44	45	44	47	51
12	39	43	45	44	46	50
13	40	41	44	43	46	49
14	40	44	43	44	47	49
21	41	41	47	43	46	52
22	42	40	46	42	45	51
23	38	40	44	41	45	51
24	38	40	45	41	46	50
31	35	39	46	46	46	49
32	36	40	46	46	45	50
33	34	39	46	45	45	50
34	36	39	47	45	44	49
41	39	39	45	45	48	51
42	36	40	44	45	47	50
43	33	38	46	44	46	50
44	39	39	45	46	47	49
51	35	41	43	44	47	50
52	34	43	42	44	49	50
53	33	43	44	43	48	50
54	32	43	45	43	48	49
<b>průměr</b>	<b>36,9</b>	<b>40,8</b>	<b>44,9</b>	<b>43,9</b>	<b>46,4</b>	<b>50</b>
<b>odchylka</b>	<b>2,900091</b>	<b>1,880649</b>	<b>1,333772</b>	<b>1,48324</b>	<b>1,273206</b>	<b>0,858395</b>

A, B, C, D, E, F .....označení izolací

Např. 52 – první číslo - vzorek, druhé číslo - měření

**Příloha 2 Základní parametry vyrobených vzorků izolací**

vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>o A1</b>	32	512	39,25	13,04459	<b>o B1</b>	32,5	520	43	12,09302
<b>o A2</b>	32	512	39,75	12,8805	<b>o B2</b>	34	544	40,25	13,51553
<b>o A3</b>	29,5	472	35,25	13,39007	<b>o B3</b>	34	544	39,25	13,85987
<b>o A4</b>	28,5	456	36,75	12,40816	<b>o B4</b>	33	528	39	13,53846
<b>o A5</b>	28,5	456	33,5	13,61194	<b>o B5</b>	39,5	632	42,5	14,87059
<b>průměr</b>	<b>30,1</b>	<b>481,6</b>	<b>36,9</b>	<b>13,06705</b>	<b>průměr</b>	<b>34,6</b>	<b>553,6</b>	<b>40,8</b>	<b>13,57549</b>
<b>odchylka</b>	<b>1,781853</b>	<b>28,50965</b>	<b>2,643388</b>	<b>0,466552</b>	<b>odchylka</b>	<b>2,815138</b>	<b>45,0422</b>	<b>1,848986</b>	<b>0,995091</b>

vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>o C1</b>	45,5	728	44,25	16,45198	<b>o D1</b>	55,5	888	43,75	20,29714
<b>o C2</b>	48,5	776	45,5	17,05495	<b>o D2</b>	51,5	824	41,75	19,73653
<b>o C3</b>	48	768	46,25	16,60541	<b>o D3</b>	60,5	968	45,5	21,27473
<b>o C4</b>	42	672	45	14,93333	<b>o D4</b>	57,5	920	45	20,44444
<b>o C5</b>	41,5	664	43,5	15,26437	<b>o D5</b>	52,5	840	43,5	19,31034
<b>průměr</b>	<b>45,1</b>	<b>721,6</b>	<b>44,9</b>	<b>16,06201</b>	<b>průměr</b>	<b>55,5</b>	<b>888</b>	<b>43,9</b>	<b>20,21264</b>
<b>odchylka</b>	<b>3,267262</b>	<b>52,27619</b>	<b>1,069462</b>	<b>0,914251</b>	<b>odchylka</b>	<b>3,674235</b>	<b>58,78775</b>	<b>1,464155</b>	<b>0,746612</b>

vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	vzorky	váha [g]	plošná hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	tloušťka [mm]	hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>o E1</b>	65	1040	46,5	22,36559	<b>o F1</b>	96,5	1544	49,75	31,03518
<b>o E2</b>	67,5	1080	45,5	23,73626	<b>o F2</b>	96	1536	51	30,11765
<b>o E3</b>	70,5	1128	45	25,06667	<b>o F3</b>	95,5	1528	49,5	30,86869
<b>o E4</b>	63	1008	47	21,44681	<b>o F4</b>	90	1440	50	28,8
<b>o E5</b>	71	1136	48	23,66667	<b>o F5</b>	87	1392	49,75	27,9799
<b>průměr</b>	<b>67,4</b>	<b>1078,4</b>	<b>46,4</b>	<b>23,2564</b>	<b>průměr</b>	<b>93</b>	<b>1488</b>	<b>50</b>	<b>29,76028</b>
<b>odchylka</b>	<b>3,453259</b>	<b>55,25215</b>	<b>1,193734</b>	<b>1,391386</b>	<b>odchylka</b>	<b>4,257347</b>	<b>68,11755</b>	<b>0,586302</b>	<b>1,329805</b>

**Označení v tabulce např.:**

*o*..... označení experimentu s hustotou, *D*..... označení izolace, 2..... druhý vzorek z izolace *D*

***Příloha 3 Parametry polyuretanových pěn***

	<b>Rozměry: š x d x v [m]</b>	<b>Objem [m³]</b>	<b>Hmotnost [kg]</b>	<b>hustota [kg/m³]</b>	<b>λ [w/m.K]</b>	<b>c<sub>p</sub> E+6 [J/m³.K]</b>	<b>a E-6 [m²/s]</b>
<b>K5040</b>	0,29x0,29x0,1	0,00841	0,410	48,73	0,0431	0,117	0,369
<b>K4036</b>	0,29x0,29x0,1	0,00841	0,335	39,77	0,0422	0,104	0,407

**Příloha 4** Naměřené hodnoty parametrů vzorků izolací

vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]	vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]	vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]
<b>o A11</b>	0,0484	0,096	0,506	<b>o B11</b>	0,047	0,082	0,576	<b>o C11</b>	0,0447	0,075	0,597
<b>o A12</b>	0,0474	0,093	0,512	<b>o B12</b>	0,0455	0,079	0,561	<b>o C12</b>	0,0449	0,076	0,589
<b>o A21</b>	0,0495	0,091	0,542	<b>o B21</b>	0,0476	0,085	0,562	<b>o C21</b>	0,0446	0,082	0,543
<b>o A22</b>	0,0492	0,087	0,562	<b>o B22</b>	0,0457	0,079	0,579	<b>o C22</b>	0,0445	0,078	0,571
<b>o A31</b>	0,0486	0,089	0,546	<b>o B31</b>	0,0468	0,083	0,566	<b>o C31</b>	0,0442	0,082	0,537
<b>o A32</b>	0,0476	0,093	0,514	<b>o B32</b>	0,0456	0,079	0,577	<b>o C32</b>	0,0443	0,082	0,542
<b>o A41</b>	0,0497	0,088	0,565	<b>o B41</b>	0,0468	0,081	0,581	<b>o C41</b>	0,0442	0,086	0,513
<b>o A42</b>	0,0474	0,086	0,552	<b>o B42</b>	0,046	0,08	0,576	<b>o C42</b>	0,0433	0,082	0,526
<b>o A51</b>	0,0477	0,09	0,528	<b>o B51</b>	0,046	0,083	0,557	<b>o C51</b>	0,0447	0,079	0,582
<b>o A52</b>	0,047	0,088	0,535	<b>o B52</b>	0,0456	0,078	0,581	<b>o C52</b>	0,0449	0,079	0,568
<b>průměr</b>	<b>0,04825</b>	<b>0,0901</b>	<b>0,5362</b>	<b>průměr</b>	<b>0,04626</b>	<b>0,0809</b>	<b>0,5716</b>	<b>průměr</b>	<b>0,04443</b>	<b>0,0801</b>	<b>0,5568</b>
<b>odchylka</b>	<b>0,000969</b>	<b>0,003143</b>	<b>0,020906</b>	<b>odchylka</b>	<b>0,000732</b>	<b>0,002283</b>	<b>0,009119</b>	<b>odchylka</b>	<b>0,000474</b>	<b>0,003315</b>	<b>0,028448</b>

vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]	vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]	vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	$c_p$ E+6 [J/m³.K]	$\alpha$ E-6 [m²/s]
<b>o D11</b>	0,0439	0,083	0,526	<b>o E11</b>	0,045	0,089	0,507	<b>o F11</b>	0,0446	0,093	0,481
<b>o D12</b>	0,0434	0,082	0,527	<b>o E12</b>	0,0428	0,082	0,52	<b>o F12</b>	0,0443	0,092	0,482
<b>o D21</b>	0,0442	0,084	0,526	<b>o E21</b>	0,0454	0,083	0,545	<b>o F21</b>	0,0431	0,093	0,464
<b>o D22</b>	0,0438	0,075	0,585	<b>o E22</b>	0,0432	0,079	0,544	<b>o F22</b>	0,0457	0,095	0,481
<b>o D31</b>	0,0447	0,092	0,487	<b>o E31</b>	0,0446	0,083	0,534	<b>o F31</b>	0,0433	0,094	0,458
<b>o D32</b>	0,0434	0,083	0,526	<b>o E32</b>	0,0438	0,08	0,545	<b>o F32</b>	0,0439	0,087	0,505
<b>o D41</b>	0,043	0,087	0,498	<b>o E41</b>	0,0447	0,092	0,484	<b>o F41</b>	0,0463	0,091	0,509
<b>o D42</b>	0,0436	0,084	0,521	<b>o E42</b>	0,044	0,085	0,515	<b>o F42</b>	0,0442	0,09	0,491
<b>o D51</b>	0,0444	0,08	0,552	<b>o E51</b>	0,0447	0,088	0,51	<b>o F51</b>	0,0437	0,094	0,465
<b>o D52</b>	0,0436	0,081	0,536	<b>o E52</b>	0,0427	0,085	0,503	<b>o F52</b>	0,0435	0,096	0,454
<b>průměr</b>	<b>0,0438</b>	<b>0,0831</b>	<b>0,5284</b>	<b>průměr</b>	<b>0,04409</b>	<b>0,0846</b>	<b>0,5207</b>	<b>průměr</b>	<b>0,04426</b>	<b>0,0925</b>	<b>0,479</b>
<b>odchylka</b>	<b>0,000514</b>	<b>0,004433</b>	<b>0,026937</b>	<b>odchylka</b>	<b>0,000945</b>	<b>0,004088</b>	<b>0,020806</b>	<b>odchylka</b>	<b>0,001035</b>	<b>0,002635</b>	<b>0,018927</b>

**Označení v tabulce např.:**

*o*..... označení experimentu s hustotou, *D*..... označení izolace, 2..... druhý vzorek z izolace *D*,  
*l*..... měření

**Příloha 5 Hmotnost vzorků při sušení (dynamika vysoušení)**

Čas [min]	0	10	22	35	50	65	80
<b>VD2</b>	50,92 g	49,36 g	48,60 g	48,40 g	48,31 g	48,07 g	<b>48,07 g</b>
<b>VD4</b>	57,11 g	55,29 g	54,60 g	54,31 g	54,18 g	54,15 g	<b>54,15 g</b>

**Označení v tabulce např.:**

V..... označení experimentu s vlhkostí

D..... označení izolace

2..... druhý vzorek z izolace D

**Příloha 6 Hmotnost vzorků po 24 hod. v klimatizační skříni při různých relativních vlhkostech  $\varphi$  % a laboratorní teplotě 20 °C**

Rel. vlhkost [%]	20	30	40	50	60	70	80	90
<b>VD2</b>	49,3	50,1	51,5 g	52,5 g	52,9 g	53,4 g	54,1 g	55,2 g
<b>VD4</b>	56	56,9	57,5 g	58,8 g	59,2 g	59,8 g	60,2 g	61,9 g

**Příloha 7 Obsah vlhkosti ve vzorcích izolací [g/g]**

Relativní vlhkost [%]	20	30	40	50	60	70	80	90
<b>v D2</b>	0,026	0,042	0,058	0,092	0,1	0,111	0,125	0,148
<b>v D4</b>	0,034	0,051	0,062	0,086	0,093	0,104	0,112	0,143
<b>Průměr</b>	<b>0,03</b>	<b>0,0465</b>	<b>0,06</b>	<b>0,089</b>	<b>0,0965</b>	<b>0,1075</b>	<b>0,1185</b>	<b>0,1455</b>
<b>odchylka</b>	<b>0,005657</b>	<b>0,006364</b>	<b>0,002828</b>	<b>0,004243</b>	<b>0,00495</b>	<b>0,00495</b>	<b>0,009192</b>	<b>0,003536</b>

**Příloha 8** Naměřené hodnoty vzorků – vliv vlhkosti

	20% RH při 20 °C			30% RH p ři 20 °C		
vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	cp E+6 [J/m³.K]	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]
v D21	0,0429	0,083	0,518	0,0431	0,088	0,489
v D22	0,0415	0,069	0,603	0,0433	0,091	0,476
v D41	0,0428	0,079	0,542	0,0429	0,09	0,476
v D42	0,0423	0,072	0,589	0,0431	0,085	0,507
průměr	<b>0,042375</b>	<b>0,07575</b>	<b>0,563</b>	<b>0,0431</b>	<b>0,0885</b>	<b>0,487</b>
odchylka	<b>0,00064</b>	<b>0,006397</b>	<b>0,039758</b>	<b>0,000163</b>	<b>0,002646</b>	<b>0,014674</b>

	40% RH při 23 °C			50% RH p ři 20 °C		
vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]
v D21	0,0442	0,084	0,526	0,0445	0,094	0,474
v D22	0,0438	0,075	0,585	0,0449	0,084	0,535
v D41	0,043	0,087	0,498	0,0437	0,092	0,476
v D42	0,0436	0,084	0,521	0,0448	0,087	0,516
průměr	<b>0,04365</b>	<b>0,0825</b>	<b>0,5325</b>	<b>0,044475</b>	<b>0,08925</b>	<b>0,50025</b>
odchylka	<b>0,0005</b>	<b>0,005196</b>	<b>0,037063</b>	<b>0,000544</b>	<b>0,004573</b>	<b>0,030181</b>

	60% RH při 20 °C			70% RH p ři 20 °C		
vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]
v D21	0,0448	0,089	0,504	0,0457	0,091	0,502
v D22	0,0446	0,083	0,536	0,046	0,089	0,516
v D41	0,0437	0,096	0,456	0,0446	0,092	0,482
v D42	0,0447	0,089	0,505	0,0449	0,086	0,52
průměr	<b>0,04445</b>	<b>0,08925</b>	<b>0,50025</b>	<b>0,0453</b>	<b>0,0895</b>	<b>0,505</b>
odchylka	<b>0,000507</b>	<b>0,005315</b>	<b>0,033029</b>	<b>0,000658</b>	<b>0,002646</b>	<b>0,017166</b>

	80% RH při 20 °C			90% RH p ři 20 °C		
vzorek	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]	$\lambda$ [w/m.K]	cp E+6 [J/m³.K]	a E-6 [m²/s]
v D21	0,0461	0,099	0,466	0,0464	0,097	0,479
v D22	0,0459	0,092	0,5	0,0455	0,097	0,468
v D41	0,0458	0,1	0,456	0,0459	0,107	0,416
v D42	0,0462	0,098	0,473	0,0464	0,107	0,434
průměr	<b>0,046</b>	<b>0,09725</b>	<b>0,47375</b>	<b>0,04605</b>	<b>0,102</b>	<b>0,44925</b>
odchylka	<b>0,000183</b>	<b>0,003594</b>	<b>0,018839</b>	<b>0,000436</b>	<b>0,005774</b>	<b>0,029296</b>

Označení v tabulce např.:

V..... označení experimentu s vlhkostí

D..... označení izolace

2..... druhý vzorek z izolace D

1..... měření